تكنولوجيا الإحتراق وإنتاج الطاقة الحرارية



المؤلف

D.P. Gupta

ترجمة وتنقيح

مهندس استشارى

محمد أحمد السيد خليل

دار الكتب العلمية
للنشر والتوزيع
القاهرة

تكنولوجيا الإحتراق وإنتاج الطاقة الحرارية

المؤلف
D.P. Gupta

ترجمة وتنقيح
مهندس إستشارى
محمد أحمد خليل

الكتـــــاب	:	**تكنولوجيا الاحتراق وإنتاج الطاقة الحرارية**
المؤلـــــف	:	م. محمد أحمد خليل
الناشـــــر	:	دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع – القاهرة
المـقـــاس	:	24 X 17
عدد الصفحات	:	200
الطبعـــــة	:	الأولى
رقـم الإيـداع	:	2009/24041
ردمـــــك	:	978 977 287 864 X

الاخراج الفنى وتصميم الغلاف : جمال خليفة

المـــونتــــاج الفنـــى : محمد حسنى

دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع

50 شارع الشيخ ريحان – عابدين – القاهرة

☎ **27948619- 27954229**

فاكس: **27928980**

لمزيد من المعلومات يرجي زيارة موقعنا على الإنترنت

www.sbhegypt.org

e-mail : sbh@link.net

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمة

فى هذا الكتاب تم تناول موضوع تكنولوجيا الإحتراق وإنتاج الطاقة الحرارية، حيث تم تناول المبادئ العامة للإحتراق لمختلف أنواع الوقود الحفرى فى العمليات الصناعية وتشغيل الغلايات وذلك بهدف تحقيق أقصى إستفادة من الطاقة الحرارية وترشيد استخداماتها. وقد تم تناول هذا الموضوع فى سبعة فصول:

حيث تناول الفصل الأول المبادئ العامة والفصل الثانى نظم إحتراق الوقود الصلب والفصل الثالث لمواقد إحتراق الوقود السائل والغازى أما الفصل الرابع فقد تناول حسابات الإحتراق وخصص الفصل الخامس لموضوع تحليل الغاز وتعيين القيمة الحرارية. والفصل السادس تناول موضوع إحتراق طبقة التميؤ والفصل السابع والاخير فقد خصص لتناول نظم الإحتراق وإحكامها.

وتلك الموضوعات ذات أهمية بالنسبة للمهندسين والفنيين والعاملين فى المجالات الصناعية والإنتاجية نحو تصميم وتشغيل نظم الإحتراق باستخدام الأنواع المختلفة من المواقد ومختلف أنواع الوقود.

ويعتبر هذا الإصدار إضافة للمكتبة العربية في مجال الطاقة.

والله أسأل أن يتحقق ما نرجو من الإفاده

مهندس إستشارى

محمد أحمد السيد خليل

1

الفصل الأول

المبادئ العامة
للإحتراق وأنواع الاحتراق

مبادئ الإحتراق :

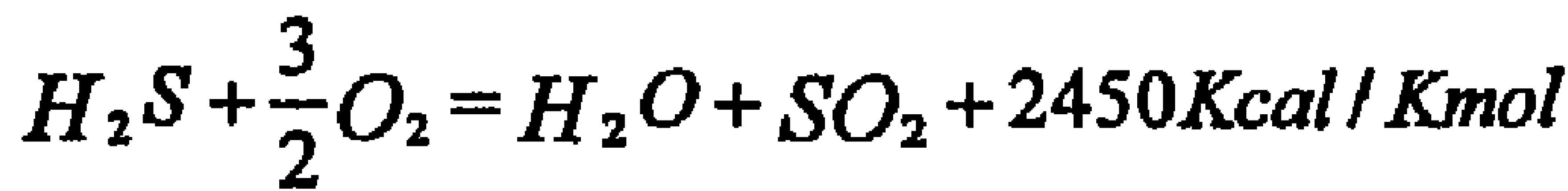
كل الوقود الحفرى التقليدى (الصلب) السائل والغاز، يحتوى أساساً على كربون أو هيدروجين والذى عند الإحتراق يتفاعل مع أكسجين الهواء الجوى مكوناً ثانى أكسيد الكربون، أو أول أكسيد الكربون أو بخار الماء.

الوقود الصلب يتم حرقه فى طبقات فى كتلة (أو شكل حبيبات صغيرة) أو فى الشكل المطحون العالق فى تدفق الهواء.

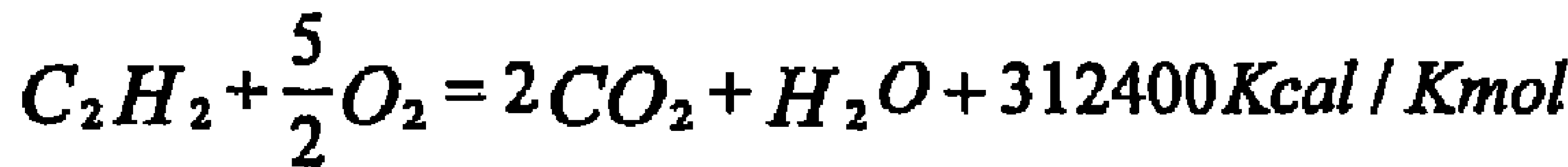
الوقود السائل يتم حرقه إما بالتبخير والخلط مع الهواء قبل الحرق (حيث يكون السلوك مثل الوقود الغازى) أو فى شكل نقاط دقيقة التى تتبخر عند الخلط مع تدفق الهواء وأثناء الحرق.
الوقود الغازى يتم حرقه فى مواقد حيث الوقود والهواء يتم خلطهم مسبقاً أو أن يتم دفق كلا من الوقود والهواء كل على حده نحو الفرن مع الخلط معاً متزاماً مع تقدم الإحتراق.

النوع الأول من الإحتراق يعطى لهب سابق الخلط، النوع الثانى يسمى الإحتراق مع إنتشار اللهب.

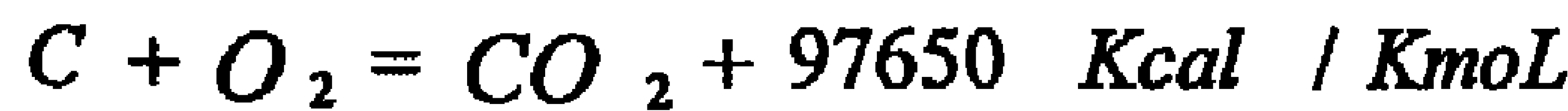
كل الوقود يحتوى على عناصر أساسية مثل الكربون، الهيدروجين، الكبريت أو مركبات تلك العناصر. إحتراق الوقود يوصف بمساعدة القليل من المعادلات الكيميائية البسيطة كالآتى:



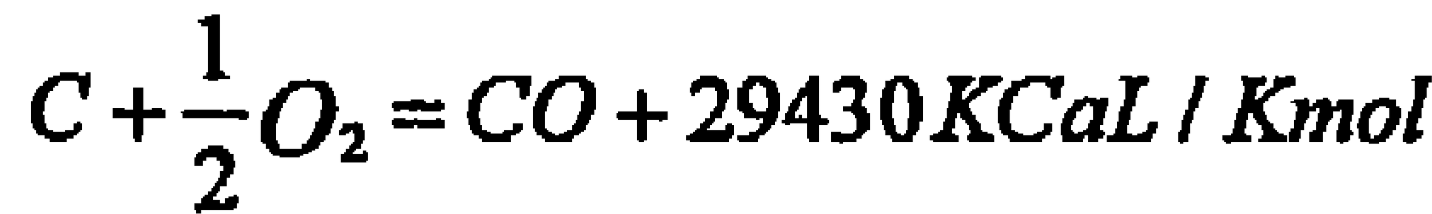
$$H_2S+\frac{3}{2}O_2=H_2O+SO_2+2450Kcal/Kmol$$



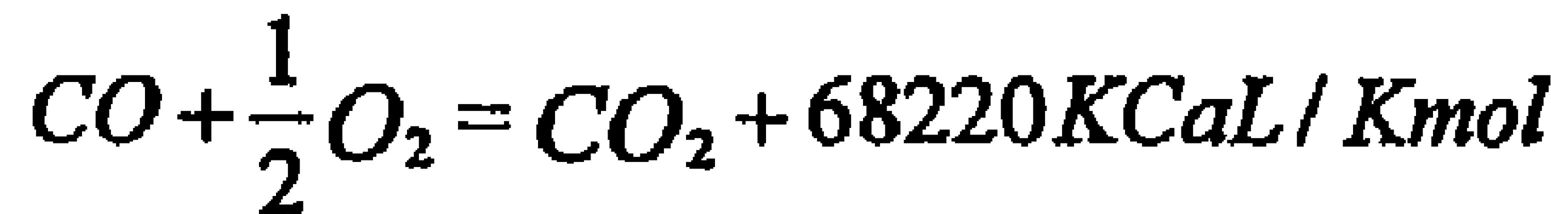
$$C_2H_2+\frac{5}{2}O_2=2CO_2+H_2O+312400Kcal/Kmol$$



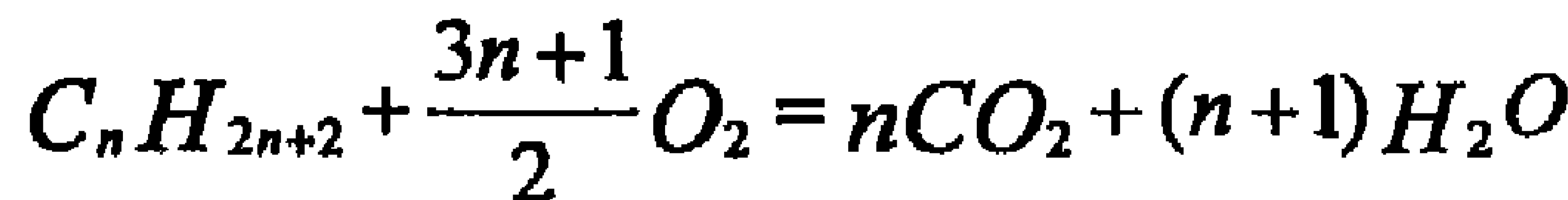
$$C+O_2=CO_2+97650\ Kcal\ /KmoL$$



$$C+\frac{1}{2}O_2=CO+29430KCaL/Kmol$$



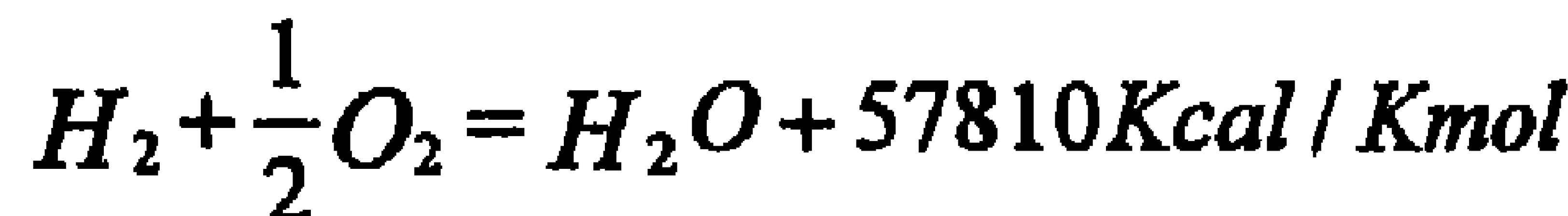
$$CO+\frac{1}{2}O_2=CO_2+68220KCaL/Kmol$$



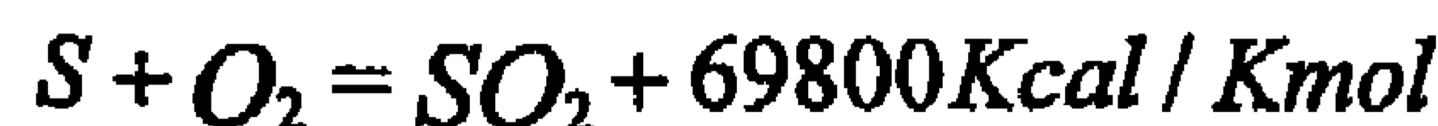
$$C_nH_{2n+2}+\frac{3n+1}{2}O_2=nCO_2+(n+1)H_2O$$



$$C_nH_m+(n+m/4)O_2=nCO_2+mH_2O$$



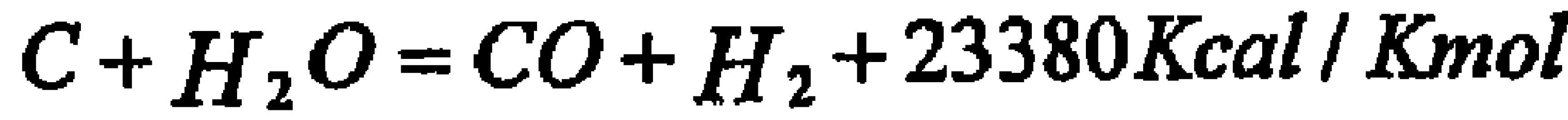
$$H_2+\frac{1}{2}O_2=H_2O+57810Kcal/Kmol$$



$$S+O_2=SO_2+69800Kcal/Kmol$$

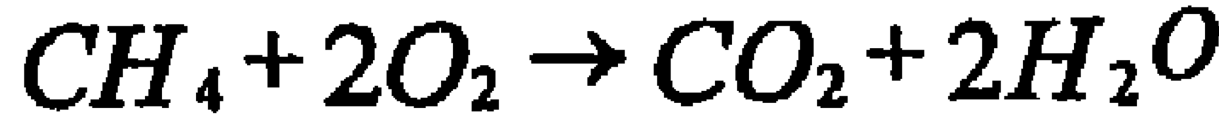


$$CH_4+2O_2=CO_2+2H_2O+192400Kcal/Kmol$$



$$C + H_2O = CO + H_2 + 23380 Kcal / Kmol$$

عند النظر فى التفاعل الآتى :



$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

فإنه يمكن القول بأن واحد كيلو مول من الميثان (CH_4) يتفاعل مع اثنين كيلو مول من الأكسجين (O_2) لإنتاج واحد كيلو مول من ثانى أكسيد الكربون (CO_2) واثنين كيلو مول من الماء (H_2O).

كيلو جرام جزئ والذى يسمى كيلو مول يستخدم فى حساب الاحتراق كوحدة الموازن. الوزن الجزيئ (Molecular Weight) لأى مادة بالكيلو جرام يمثل واحد كيلو مول (واحد كيلو جزئ Kilo-mole 1).

لذلك فإن واحد كيلو مول من الهيدروجين (H_2) له كتلة 2 كيلو جرام وواحد كيلو مول من الكربون (له كتلة 12 كيلو جرام). لذا فإن واحد كيلو مول من الميثان (CH_4) له كتلة 16 كيلو جرام (4+12).

من التفاعل السابق يمكن القول ان 16 كيلو جرام من غاز الميثان تتفاعل مع 64 كيلو جرام من الأكسجين (حيث جزئ الأكسجين O_2 وزنه 32 كيلو جرام) لإنتاج 44 كيلو جرام من CO، 36 كيلو جرام من H_2O (وزن جزئ الماء — واحد مول- يزن 18 كيلو جرام) .

عملية الإحتراق: Combustion Process

فى عملية الإحتراق فإن الإتحاد الكيماوى السريع للأكسجين مع الجزئ المحترق من الوقود ينتج عنه إنطلاق للحرارة. معظم أنواع الوقود العادية تحتوى على الكربون والهيدروجين، أما في شكل عنصر أو كأجزاء من المركبات — هذه العناصر والمركبات القابلة للإحتراق تتفاعل مع الأكسجين لتكوين (CO_2) وبخار الماء (H_2O). كذلك فإنه يمكن كذلك تكوين أول أكسيد الكربون (CO). الكبريت يوجد عادة في بعض أنواع الوقود، ونواتج الإحتراق لمركبات الكبريت يمكن أن تسبب التآكل وتلوث البيئة.

متطلبات الإحتراق Requirements For Combustion

- الوقود
- الأكسجين
- والثلاث T

الوقت Time ، درجة الحرارة Temperature ، الإضطراب Turbulence

الوقود:

الوقود المستخدم عادة هو الزيت ، الغاز، الفحم وفحم اللجنيت والانواع الأخرى هى الخشب ، الأسفلت، السائل الأسود، الفحم الحجرى(Peat)/ المخلفات المنزلية .. إلخ.

الأكسجين:

المصدر الطبيعي للأكسجين للإحتراق هو الهواء. الهواء هو خليط من النيتروجين والأكسجين وبخار الماء مع كميات صغيرة جداً من الغازات الخاملة والتى عادة يتم إهمالها. الهواء يحتوى على 79٪ نيتروجين ، 21 ٪ أكسجين بالحجم، النيتروجين لا يدخل فى عملية الإحتراق وهذا يعنى أن 79٪ من الهواء الداخل فى عملية الإحتراق لا يشارك فى التفاعل ولكن يتم تسخينه مع الأكسجين مما يسبب ضعف الكفاءة لعملية الإحتراق. يجب إستخدام كتلة ضخمة من الهواء لعملية الاحتراق للحصول على كمية الاكسجين المطلوبة. تأثير التخفيف بالنيتروجين يسبب مشاكل كثيرة بالنسبة للكفاءة.

الثلاث T:

- الوقت : Time

يجب توفير الوقت اللازم لحدوث الإحتراق الكامل. هذه الفترة الزمنية ذات أهمية بسبب تأثير التخفيف للنيتروجين فى الهواء.

درجة الحرارة: Temperature

عند وصول الوقود إلى درجة حرارة الإحتراق فإن الأكسدة يحدث لها إسراع كبير. خليط الوقود / الهواء يجب تسخينه إلى درجة حرارة الإحتراق. للمساعدة فى حدوث الإحتراق فإن درجة حرارة الإحتراق للوقود العادى هى:

الزيت: 260 °م ، الخشب: 290 °م، الفحم البيتوميني 400 °م، H_2 – 565 °م، CH_4 705 °م، CO 650 °م، S 245 °م .

الإضطراب : Turbulence

من الأهمية الكبيرة الخلط الجيد للوقود والهواء وإلا فإن الإحتراق الكامل سوف لا يحدث، وأفضل طريقة لتجنب هذه المشكلة هو الخلط بالإضطراب.

الإحتراق الجيد يحدث عند الأفران بالهواء الكافى لحرق كل الوقود. لضمان أن كل الوقود قد تم استهلاكه فإنه يتم الإمداد بهواء إضافي. وهذا يسمى الهواء الزائد (Excess Air).

أسباب الفقد فى الكفاءة:

الحرارة التى تحملها الغازات العادمة هى دلالة لوزن الغاز فى وحدة الزمن، درجة حرارة الغاز وحرارته النوعيه.

<u>فقد الحرارة المحسوسة</u> <u>(Sensible Heat Loss)</u> = $F_g \times S_g \times (T_g - T_a)$

حيث:

F_gـ وزن الغاز العادم / الساعة.

S_g= الحرارة النوعية للغاز العادم.

T_g= درجة حرارة خروج الغاز العادم.

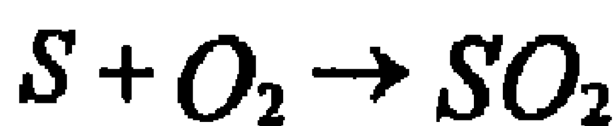
T_aـ درجة حرارة هواء الإحتراق.

هذا يوضح أن هناك إحتمالين لخفض الفقد الحرارى وذلك بخفض:

- درجة حرارة الغاز الخارج.
- وزن الغاز الصاعد نحو المدخنة.

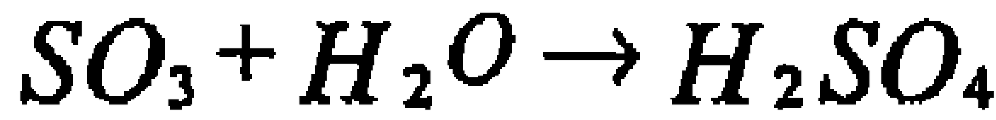
الفقد بسبب درجة حرارة الغاز الخارج:

فى نظم الحرق يحدث فقد كبير فى الطاقة عند ارتفاع درجة حرارة الغاز العادم الخارج ولكن تحقيق زيادة كبيرة فى الكفاءة بخفض درجة حرارة خروج الغاز. الخفض بحوالى 22°م فى درجة حرارة الغاز العادم ينتج عنه زيادة 1 ٪ فى الكفاءة. يمكن تحسين كفاءة الإحتراق بتوفير مبادل حرارى أما لتسخين هواء الإحتراق أو لتسخين الماء وهذا يعتبر الخطوة الأولى فى تحسين كفاءة الإحتراق. ولكن فإنه عند حرق الوقود الذى يحتوى على الكبريت فإن أقصى كمية من الحرارة التى يمكن استعادتها بأمان من الغازات العادمة تكون بدلالة درجة حرارة نقطة ندى الحامض (Acid Dew Point) للغازات العادمة. فى حالة تبريد الغازات العادمة إلى درجة حرارة أقل من نقطة الندى فإن حامض الكبريتيك سوف يتكثف على سطح المواسير، المراوح، المدخنه ... إلخ بما ينتج عنه تأثير خطير. التفاعلات هى:



$S + O_2 \rightarrow SO_2$

وبعض من SO_2 يتأكسد إلى SO_3 والذى يتفاعل مع بخار الماء فى الغاز العادم لتكوين حامض الكبريتيك.



$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

كمية صغيرة من SO_3 عند اتحادها مع تركيزات كبيرة من بخار الماء تنتج مكثفات من الحامض القوى. هذا يعنى لأنه فى حالة إتحاد كمية صغيرة من SO_3 مع بخار الماء الذى يتكثف من الغاز العادم سوف يسبب حدوث تآكل. درجة حرارة نقطة الندى تعرف بأنها درجة الحررة التى عندها سطح السائل يكون فى حالة إتزان مع الغاز الذى فوقه مباشرة. عند درجة حرارة نقطة الندى، السائل الذى يذهب نحو مجال الغاز يتم إتزانه تماماً مع الغاز الذى يذهب إلى المجال السائل. فى عملية الإحتراق حيث الوقود لا يحتوى على الكبريت، عندئذ فإن درجة حرارة نقطة الندى للغازات هى نقطة الندى للماء (أى حوالى 50 إلى 80°م). الآن عند إضافة 20 جزء فى المليون من SO_3 إلى هذا الغاز فإن درجة حرارة نقطة الندى سوف تزداد إلى حوالى 145°م وأى سطح عند أو أقل من درجة الحرارة هذه سوف يحدث له ترسيبات من محلول مركز من حامض الكبريتيك. هذا الحامض يسبب التآكل فى المراوح والمواسير والمبادلات الحرارية والمداخن. درجة حرارة نقطة الندى للحامض تتغير حسب نسبة الكبريت فى الوقود ومستوى الهواء الزائد وحالة المواقد والمحتوى من بخار الماء فى الغازات العادمة. درجة حرارة نقطة الندى للحامض تحدد كمية الحرارة التى يمكن استعادتها بأمان من الغازات العادمة. كثيراً من نظم الإحتراق تعمل عند درجات الحرارة العالية للغازات الخارجة وذلك لتجنب مشاكل تكثيف الحامض ولكن هذا يعتبر فاقد. من السهل إحكام درجة حرارة نقطة الندى للحامض وبذا تعظيم استعادة الحرارة وخفض مخاطر التآكل والتلوث الناتج عن سناج الحامض. (الحامض المكثف يتم إمتصاصه بواسطة ترسيبات الكربون على أسطح المواسير، المدخنه إلخ)، وفى حالة خروج هذا الكربون من المدخنه فإنه يسبب التلف للأمتعه وللمحاصيل .. إلخ القريبة من المصنع.

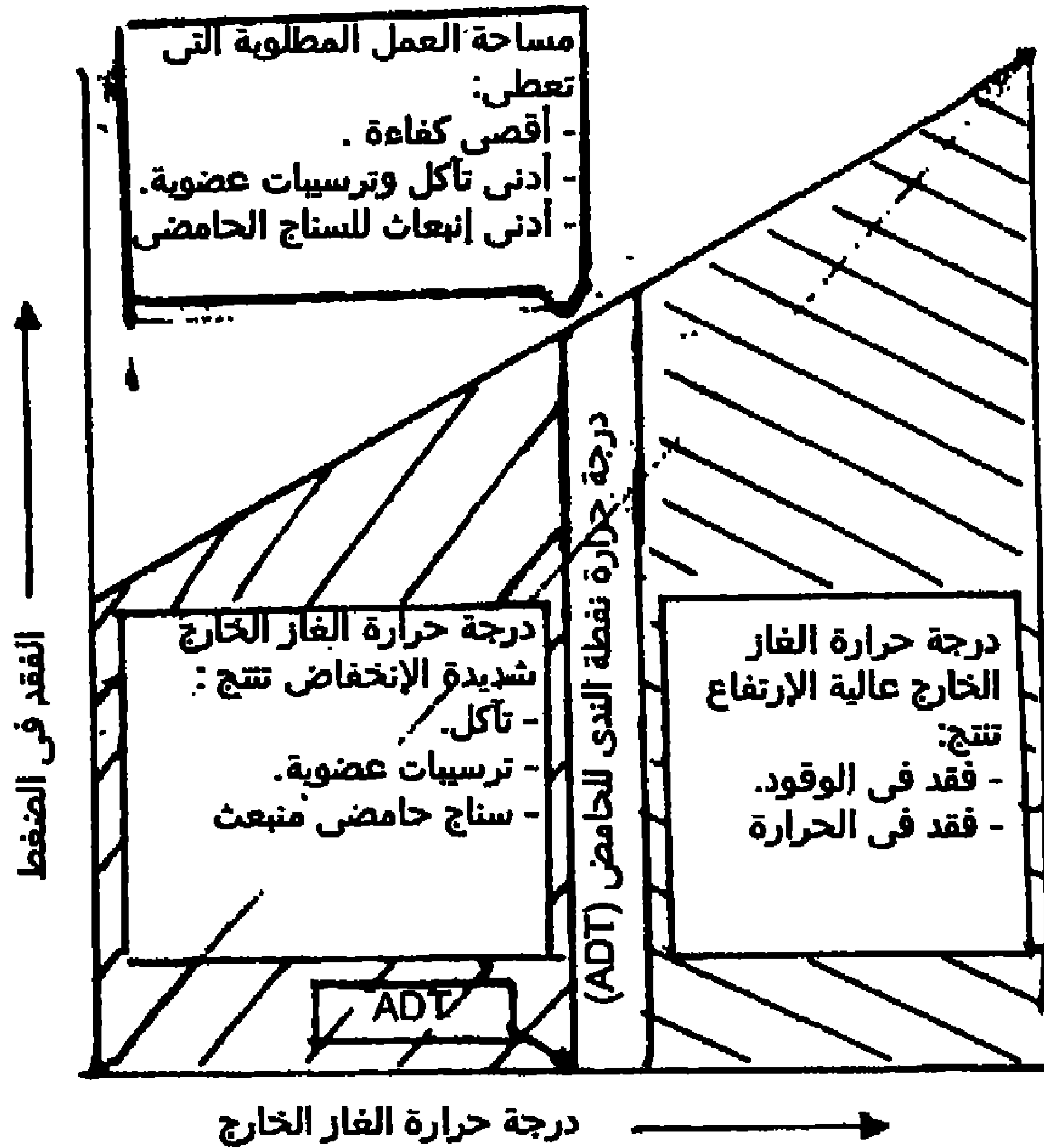
الفقد الناتج عن الهواء الزائد:

عملية الإحتراق بالهواء الزائد تزيد من كمية الغاز العادم المتوجه نحو المدخنه. عند تقليل هذا الهواء الزائد، فإننا نقلل حجم الغاز العادم كما أن الغازات الساخنة تستهلك زمن أكثر فى الإلتصاق مع أسطح الإنتقال الحرارى. هذا يقلل درجة درجة حرارة الغاز العادم الخارج. لذلك لخفض كتلة الغاز العادم فإنه يجب خفض الهواء الزائد إلى المستوى الذى يمكن من وضع الكمية

الصحيحة من الهواء فى العملية. فى حالة الإمداد بكمية من الهواء قليلة جداً فإنه يحدث إحتراق غير كامل وتكوين أول أكسيد الكربون والذى يليه إنبعاث دخان ومواد صلبه. فى حالة الإمداد الكثير بالهواء فإنه يوجد فقد زائد فى المدخنه ومشاكل أخرى مثل درجة الحرارة العالية لنقطة الندى طبقاً لنوع الوقود المستخدم.

الهدف هو الإمداد بالهواء الكافى فقط لحرق كل الوقود والمحافظة على استمرار كفاءة الإحتراق العاليه بإحكام النسبة ما بين الوقود والهواء.

العلاقة بين الفقد فى الطاقة ودرجة حرارة الغاز العادم موضح فى الشكل رقم (1).



شكل (1): العلاقة بين الفقد فى الطاقة ودرجة حرارة الغاز الخارج

قياس الأكسجين فى الغاز العادم:

الطريقة العادية للتحكم فى كمية الهواء الزائد (نسبة الوقود/الهواء)هى بقياس محتوى الغاز العادم من الأكسجين وضبط النسبة بين الوقود والهواء للحصول على مستوى الهواء الزائد أقل ما يمكن مع إستمرار المحافظة على الإحتراق الكامل.

الطرق العادية لقياس الأكسجين في الهواء العادم تتم باستخدام الآتي:

أ. نظام أخذ العينات حيث يتم سحب الغاز من مجرى ماسورة الغاز، تنظيفه، وتبريده وتجفيفه قبل ضخه إلى تحليل الغاز (Gas analyser). يوجد العديد من مشاكل الصيانة مع نظام أخذ العينات بسبب الإنسدادات، التآكل، التسرب.. إلخ.

ب. النظام بدون أخذ العينات (الذى يسمى القياس فى الموقع) باستخدام مجس الهواء العادم مع الكاشف فى الغاز العادم وبدون أخذ عينات، حيث لا تكون هناك حاجة إلى نظافة أو تبريد الغاز.

مميزات قياس الأكسجين، هو أنه يوفر إمكانية الإستدلال المباشر لكفاءة نظام الإحتراق الكلى، ذلك لأن الهواء الزائد الكلى المنبعث فى الجو له علاقة مباشرة بالأكسجين الزائد.

مميزات إستخدام إشارة الأكسجين لإحكام نسبة وقود الهواء:

لإحكام كفاءة الإحتراق فإن قياس الأكسجين يعتبر أساسي. ولكن لإحكام الإحتراق يوجد عدد من السلبيات. ذلك لأن عملية الإحتراق تتأثر بعدد من المتغيرات بخلاف نسبة الوقود / الهواء : مثل:

- خليط الهواء / الوقود:

التغيرات في معدل الحرق يتضمن تغيرات في تدفق الهواء، نحو الموقد وهذا يسبب تغيرات فى إطار التدفق للهب بما يؤثر على خلط الوقود والهواء.

الخلط الغير جيد ينتج عنه عدم اشتراك جزء من هواء الإحتراق فى عملية الإحتراق، والموقد عندئذ سوف يعمل بإستخدام مستويات أعلا من الهواء الزائد لتأكيد الإحتراق الكامل.

تلف الموقد:

المواقد تحتاج إلى الصيانة الجيدة ويمكن أن يحدث لها إنسداد أو الإهلاك. وهى مصنعه بتجاوزات خفيفه وقد يحدث لها تلف بما يسبب خفض فى كفاءة الإحتراق.

توزيع الهواء والوقود:

النظم ذات المواقد المتعددة تعتمد على إستقبال كل موقد منفرد لفس نسبة الوقود والهواء تحت كل حالات التشغيل. من المؤكد أن بعض المواقد سوف تعمل بهواء زائد أقل من المواقد الأخرى. ولتجنب إنتاج الدخان فإن التدفق الكلى لهواء الإحتراق يجب أن يكون كافياً لحاجة

الموقد الأكثر وفرة فى الوقود، والنظام الكلى للإحتراق يعمل مع مستويات هواء أعلا عن المثالى. النتيجة هى الفقد فى الحرارة الملموسة وإنخفاض الكفاءة.

ترزيز زيت الوقود:

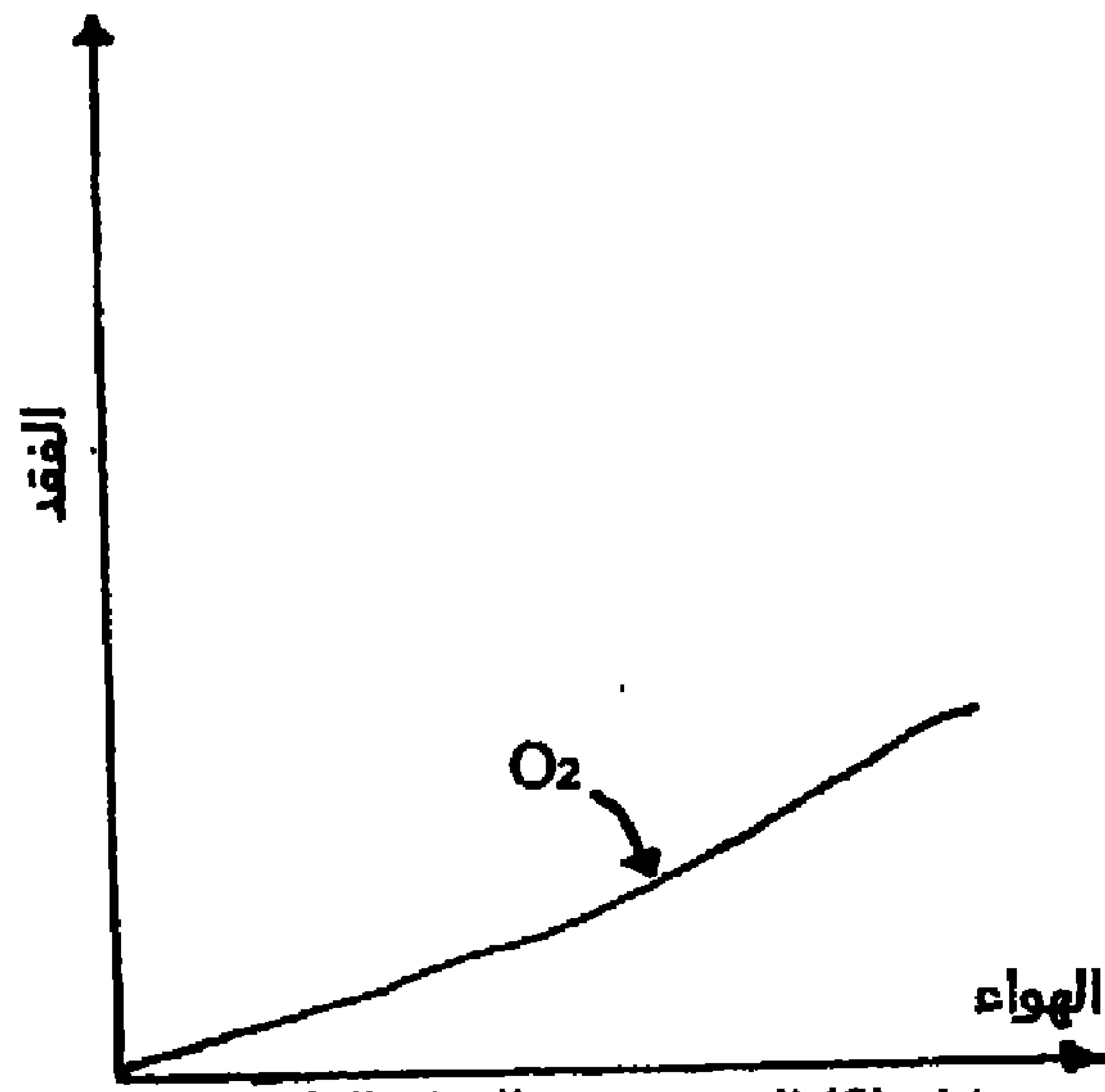
فى حالة حرق الزيت يكون من الضرورى ترزيز الزيت في شكل حبيبات رش دقيقة جداً (Fine Spray). التغيرات فى كفاءة الترزيز تحدث تغيراً فى سرعة ونظافة إحتراق الزيت. مع ضعف كفاءة الترزيز فإنه يلزم زيادة في الهواء لضمان الإحتراق الكامل.

مع تغير حالات الإحتراق والتى تتطلب تغيرات فى مستويات الهواء الزائد لتأكيد الإحتراق الكامل، فإن نقطة التحكم للتحكم في الأكسجين الزائد يجب تغييرها طبقاً لذلك. التغيرات الصحيحة فى حالات الإحتراق غير معروفة ولتجنب إحتمال عمل دخان فإن نظام الإحتراق يعمل عند مستوي أكسجين زائد مرتفع بما يكفى لإستمرار الحرق الكامل تحت أسوأ الظروف الممكنه وبذلك يكون هناك فقد في الطاقة بسبب مستوى الهواء الزائد المرتفع جداً.

مشكلة أخرى هو تسرب الهواء فى غازات الإحتراق. معظم نظم الإحتراق تعمل تحت ضغط سالب وهذا يمكن أن يسبب تسرب الهواء إلى غازات الإحتراق. الأكسجين (21٪) فى هذا الهواء يمكن أن ينتج أخطاء فى تحليل الأكسجين. عند تعيين كفاءة النظام لقياس الأكسجين الزائد ودرجة حرارة الغاز العادم فإن ذلك الهواء يجب قياسه نظراً لأن الطاقة الحرارية فى العملية تستخدم لتسخين هذا الهواء إلى درجة حرارة الغاز العادم.

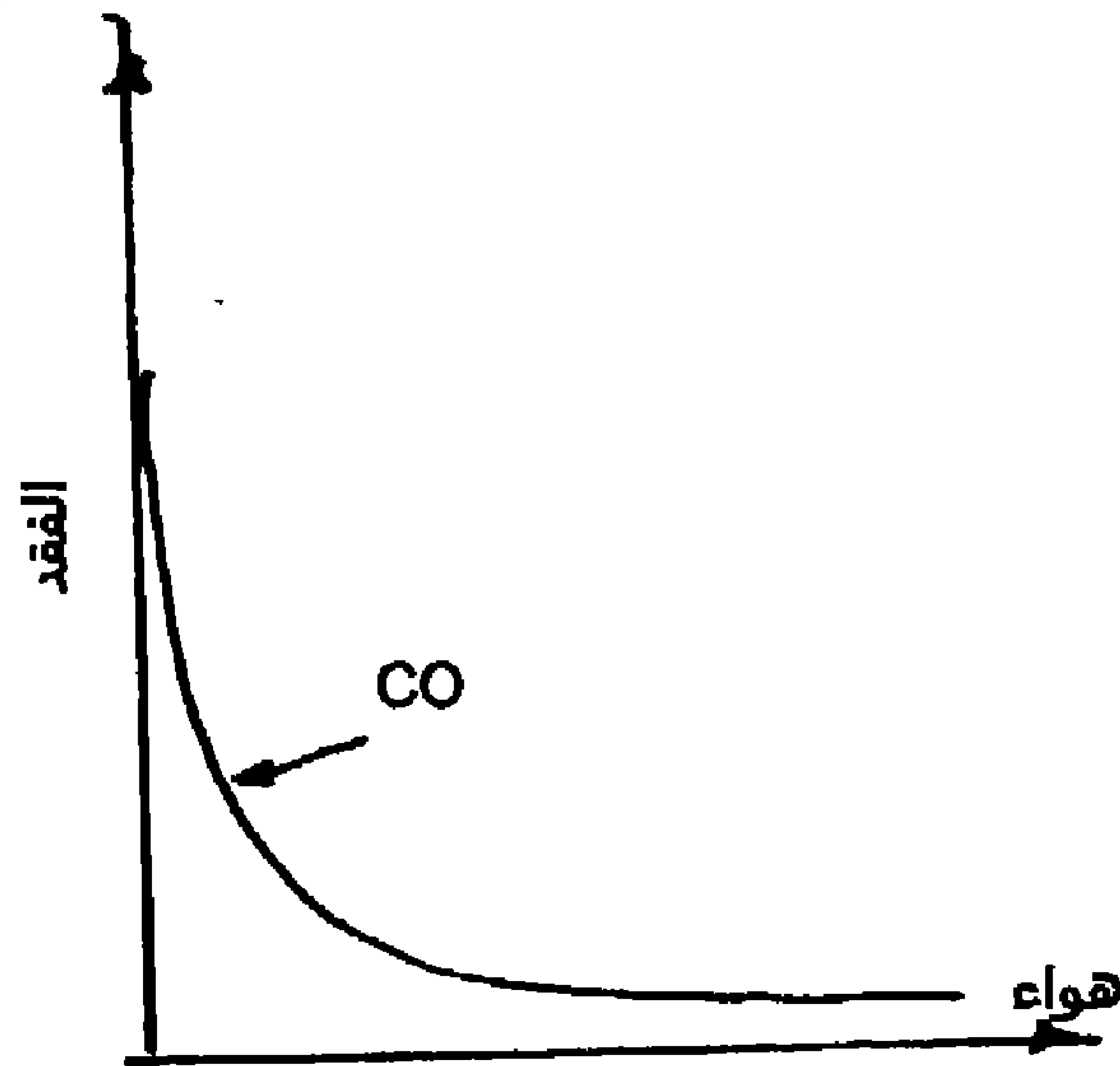
الأكسجين ليس ناتج الإحتراق ويفترض أن كل الأكسجين الذى نقوم بقياسه قد جاء من هواء الإحتراق الذى لم يستهلك فى عملية الإحتراق والذى يمكن أن لا يكون هو ذلك الحال دائماً.

لتعين المحتوى المثالى من الأكسجين فى الغازات العادمة، فإن العلاقة بين الأكسجين الزائد والفقد يمكن ملاحظتها فى الشكل(2). المنحنى ليس حاداً ولكن الفقد يمكن أن يكون كبيراً ولا توجد نقطة إرشادية التى تخبرنا بالكمية الصحيحة للهواء الزائد. بيانات تزيد عن الموضحه فى المنحنى تكون مطلوبه لتعيين المستوى الزائد المثالى للأكسجين.



شكل (2) الفقد بسبب الهواء الزائد

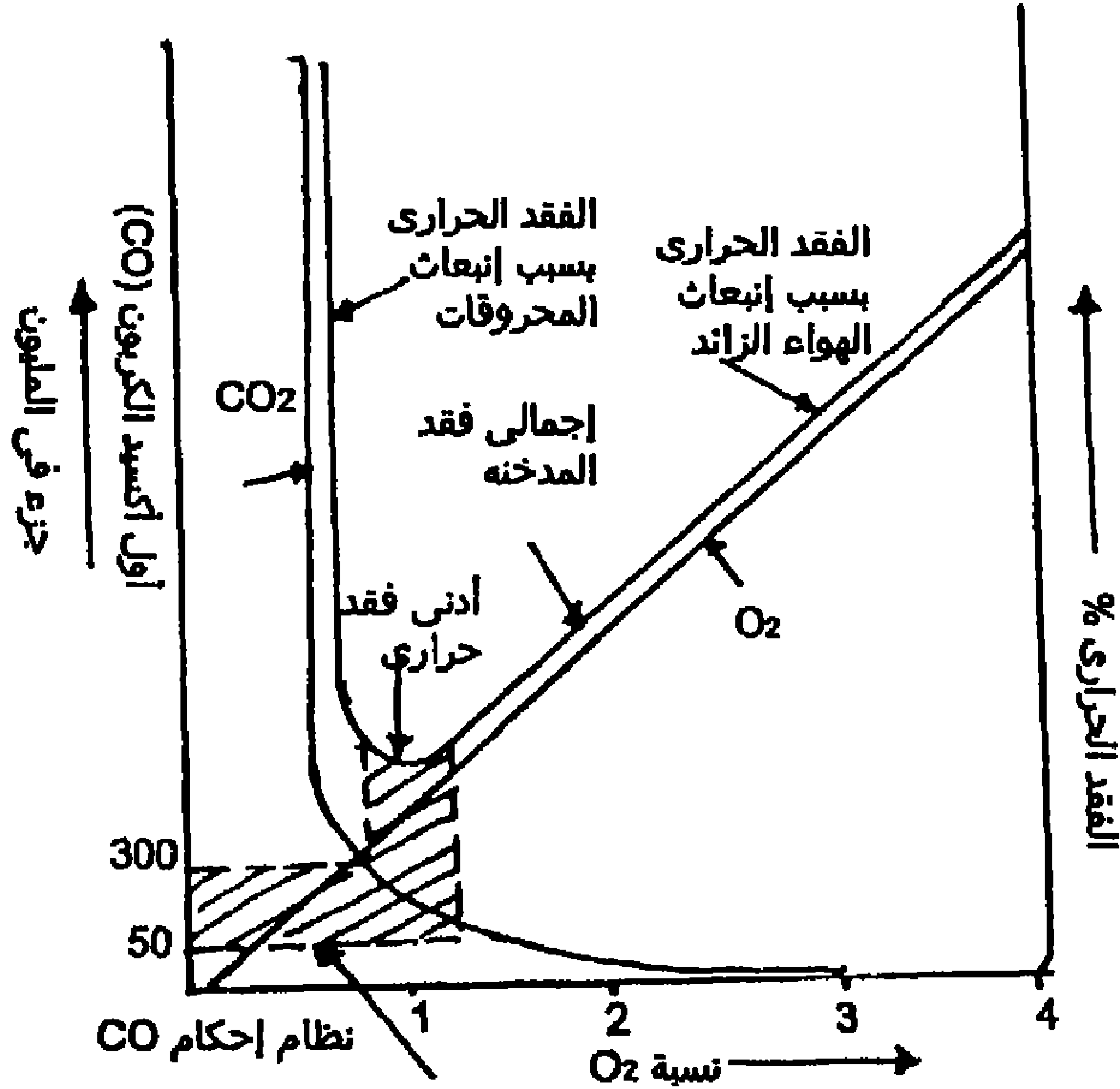
الشكل (3) يبين منحنى أول أكسيد الكربون مقابل الهواء والذى يعتبر منحنى حاد جداً، مع جمع الأشكال (2)،(3)، لكل من CO، الأكسجين فإننا يمكن أن ينتج منحنى الكلى للمدخنه، كما هو موضح فى الشكل (4) والذى يعطينا المعلومات التالية :



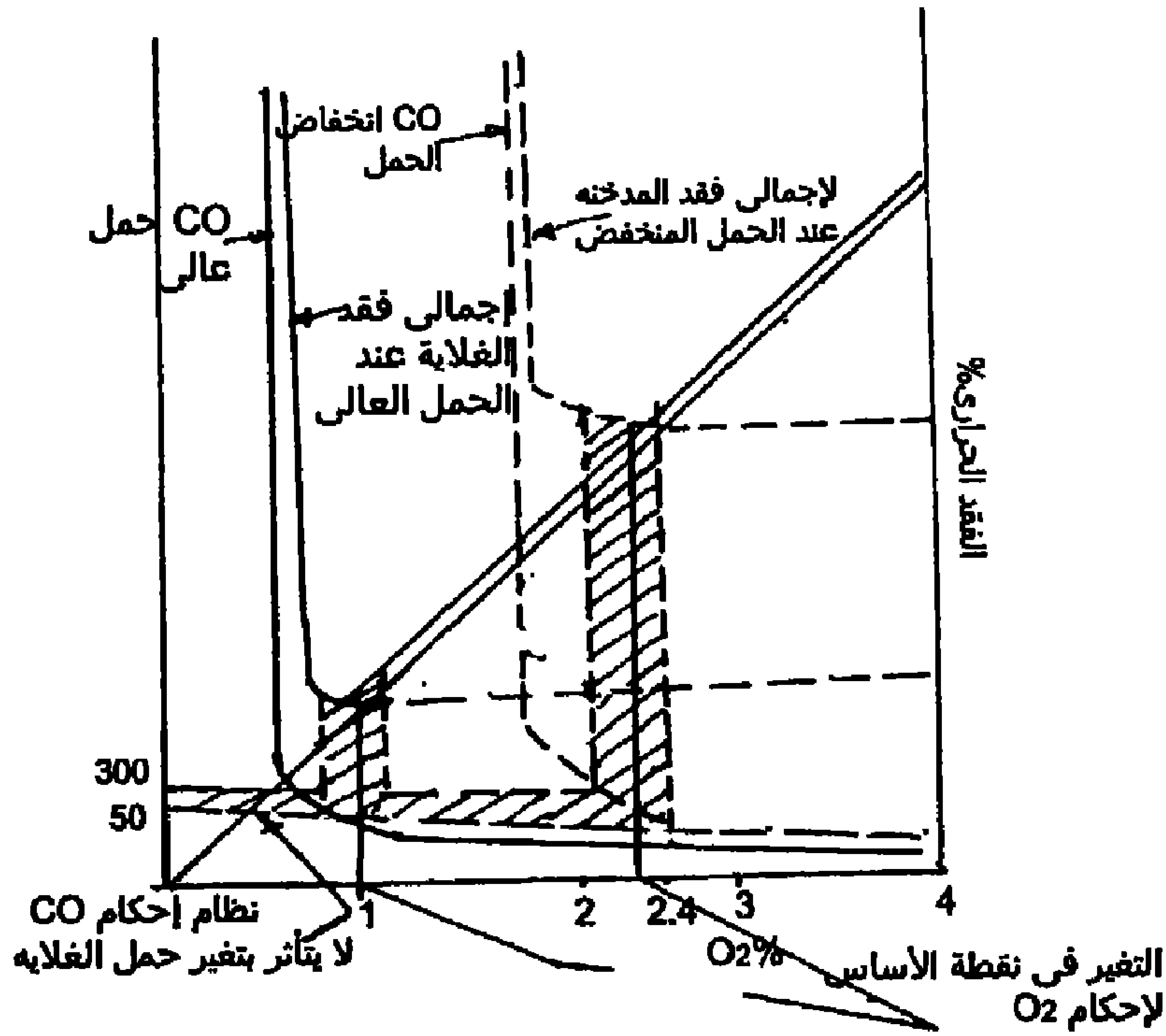
شكل (3): الفقد بسبب CO

الأكسجين الزائد لا يصل إلى الصفر قبل إنتاج CO. يكون لدينا CO والأكسجين الزائد فى نفس الوقت وليس صحيحاً أن كل الأكسجين يصل إلى الصفر قبل بداية CO. عند أدنى فقد فى المنحنى (أقصى كفاءة) فى حالة الغلايه بحرق الزيت (مثلاً)، فإننا نحتاج 1٪ أكسجين زائد وما بين 50 ، 300 جزء فى مليون من CO.

مختلف الميول لمنحنى الفقد الحرارى ذات معنى ودلالة. يكون المنحنى أكثر حدة فى الميل على جانب CO العالى (نقص فى الهواء أو وقود زائد) مقارنة على جانب الأكسجين العالى (الهواء الزائد). الفقد فى الطاقة عند حرق الكربون إلى أول أكسيد الكربون بدلاً من ثانى أكسيد الكربون مبين بوضوح. ولكن العمل مع 50 – 300 جزء فى المليون منCO يسبب خفض فى الكفاءة ليس كبيراً . إذا كانت منحنيات الأكسجين CO عند حمل منخفض للغلايه مع توقيعهم وجمعهم مع تلك الشكل (4) فإننا نحصل على الشكل (5). هنا يمكننا ملاحظة أن أدنى فقد يحدث عند حوالى 2.4 ٪ أكسجين (مقارنة بـ 1٪ عند أعلا تحميل). هذا يسبب تأثيرات خلط الوقود /الهواء .. إلخ السابق تناوله. فى حالة إستخدام إشارة الأكسجين لضبط نسبة الوقود / الهواء فإننا سوف نحتاج إلى تغيير نقطة التحديد لجهاز التحكم فى الأكسجين لتأكيد أدنى فقد عند كل الأحمال. ولكن فى حالة إختبار المنحنيات فى الشكل (5) فإنه يمكن ملاحظة أن أدنى فقد يحدث ما بين 50-300 جزء فى المليون من CO لكلا الحملين حيث تعمل الغلايه عند حالة الأمان وأقصى كفاءة بصرف النظر عن الحمل أو الوقود أنظر الشكل رقم (5).



شكل (4): العلاقة بين CO, O_2 والفقد الحرارى منحنى إجمالى فقد المدخنه

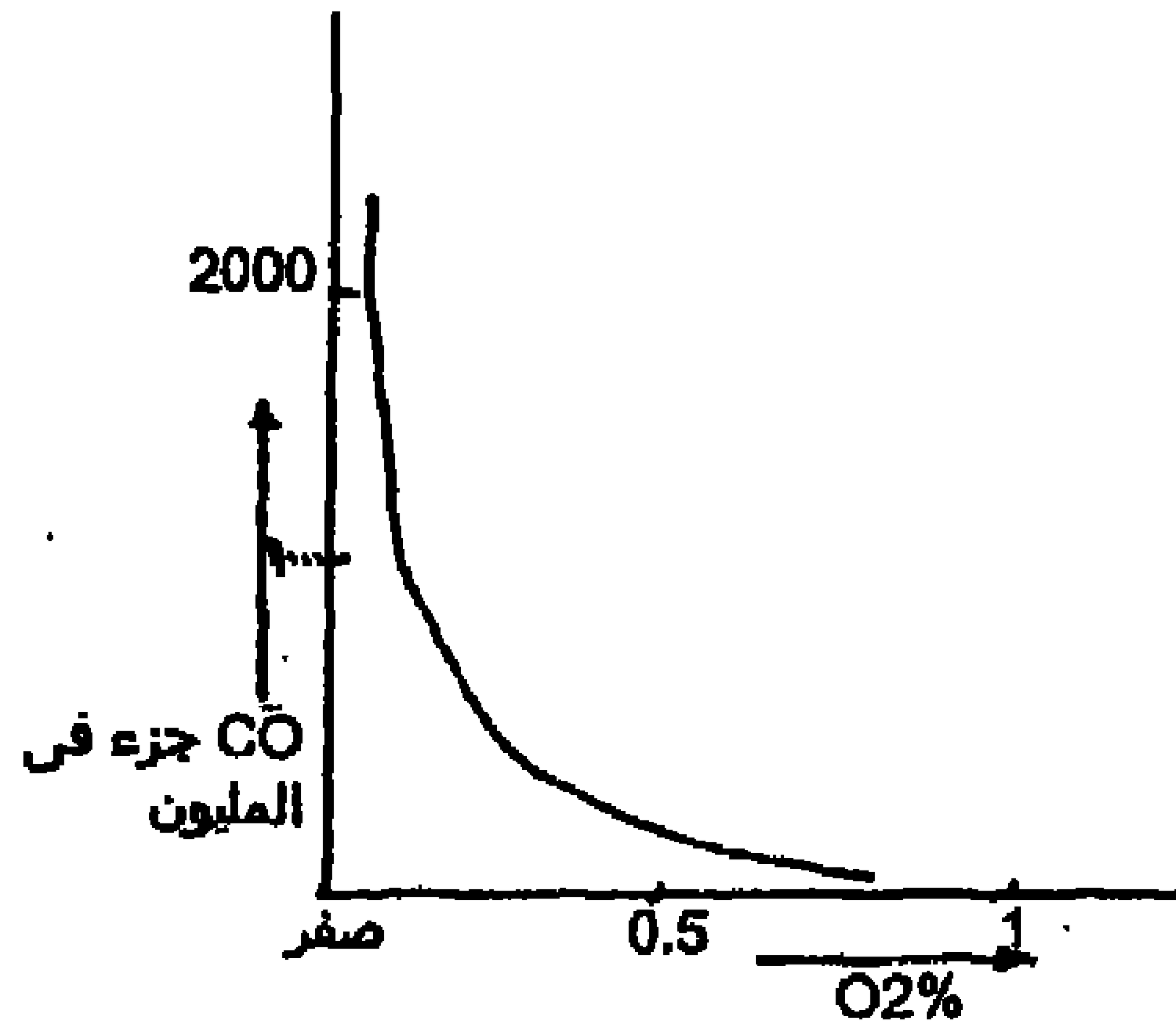


شكل (5): تأثير التغير فى حمل الغلاية على نقطة الأساس لإحكام (O2)

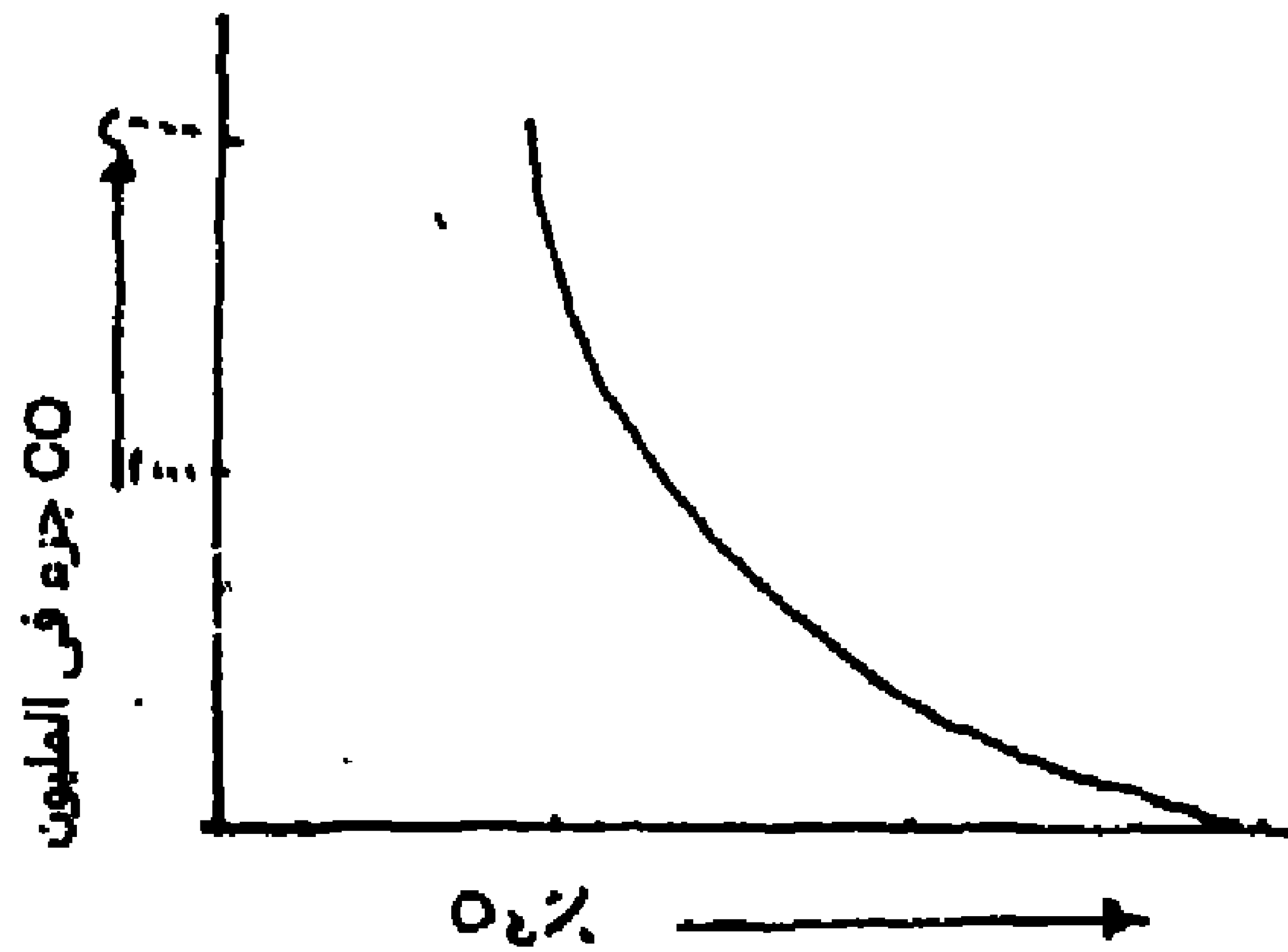
تحت أى مجموعة من حالات الإحتراق فإن نسبة الوقود / الهواء المطلوبة لإعطاء أقصى كفاءة هى تلك التى عندها يتم إنتاج كمية صغيرة من CO، ونظراً لأن CO هى ناتج الإحتراق، فإنه يمكن الحصول على معلومات نحو ظروف الإحتراق. من المفيد إحكام CO فى الغاز العادم ويستخدم هذا القياس لتعظيم نسبة الوقود/الهواء. مميزات CO هو أنه يمكن من التعويض آلياً للتغيرات فى ظروف الإحتراق، للتغيرات فى القيمة الحرارية للوقود ... إلخ. لذلك فإنه من الممكن الحصول على أقصى كفاءة ممكنه تحت أى مجموعة من الظروف بالتحكم فى نسبة الوقود/للهواء لإعطاء المستوى الصحيح لـCO فى الغاز العادم.

أنه لا يوصى بتشغيل نظام الإحتراق على مقياس CO فقط أو مقياس الأكسجين فقط. قياس CO يخبرنا عن ظروف غرفة الإحتراق وكذلك عن نسبة الوقود/الهواء. يمكننا إشارة CO لتعديل نسبة الوقود / الهواء ولإمساك CO عند مجال 50- 300 جزء فى المليون (طبقاً للوقود المستخدم) والعمل عند أعلا كفاءة ممكنه تحت أى مجموعة من الظروف.

باستخدام كلا من CO والأكسجين فإنه يمكن إكتشاف أى حالات إحتراق غير عادية كما هو موضح فى الشكل رقم (6) ، الشكل رقم (7).



شكل (6): O2/CO العلاقة لظروف العمل الجيدة

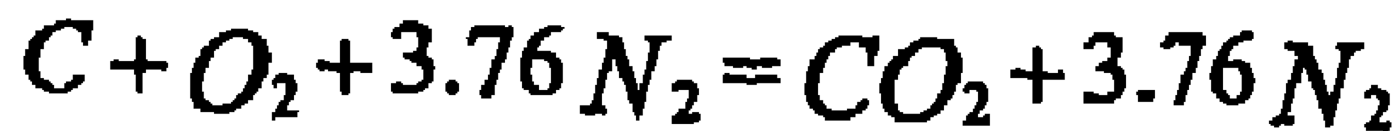


شكل (7): علاقة O2 / CO فى ظروف العمل الغير جيدة (وجود مستويات عاليه لـCO عند مستويات منخفضة لـO2)

غلايه ضخمه ذات الماء فى المواسير (Water Tube) تقوم بحرق الغاز مع القليل من الهواء الزائد وقياس كلا من CO والأكسجين. المنحيات تختلف كثيراً وفى حالة إستخدام أشارة الأكسجين لتعديل نسبة الوقود / الهواء فى الشكل رقم (6) فإننا سوف نحصل على حوالى 100 جزء فى المليون من CO عند 0.5٪ أكسجين. إذا كان لدينا نفس مجموعة النقط لـ0.5٪ على الشكل رقم (7) فإننا سوف نعمل بعدد 2000 جزء فى المليون من CO .

متطلبات الهواء النظرى والهواء الزائد للإحتراق:

لحرق أى نوع من الوقود فإن المؤكسد العادى هو الهواء. الهواء هو خليط من الأكسجين 21 ٪ والنيتروجين 79٪ (على أساس الحجم). هذا يعنى أن جزئ واحد من الأكسجين يصاحبه 3.76=21/79 جزئ من النيتروجين. المعادلة الكيميائية لإحتراق الكربون مع الهواء هى كالآتى:



$$C + O_2 + 3.76\,N_2 = CO_2 + 3.76\,N_2$$

أدنى كمية من الهواء مطلوبه للإحتراق الكامل للوقود (التى سيتم حسابها على أساس المعادلات الكيماوية الداخله فى الإحتراق) تسمى الهواء الفطرى أو متكافئ العناصر (Stoichiometric Air). ولكن عملياً يكون من الصعب الحصول على الإحتراق الكامل مع الكمية النظريه للهواء . لذلك فإنه يتم إمداد الوقود بالهواء الزائد يتطلب أدنى كمية من الهواء الزائد لحرقه كاملاً. لذلك فإن الهواء الزائد عن الإحتياجات النظرية ويعبر عنه بنسبة الهواء الزائد بالوزن ويشمل 77٪ نيتروجين، 23 ٪ أكسجين. الوقود الصلب يتطلب أقصى كمية من الهواء الزائد، بينما الوقود الغاز يتطلب أدنى كمية من الهواء الزائد. متطلبات الوقود السائل من الهواء الزائد تقع ما بين الوقود الصلب والوقود الغاز.

الطرق السريعة لحسابات الإحتراق:

المعادلات المشتقه للإحتياج النظرى للهواء، تحليل الغاز العادم ... إلخ من أساسيات الإحتراق متكافئ العناصر هو كالآتى:

1. <u>الوقود الصلب والوقود السائل:</u>

على أساس أن H_2O، S،N،O،H،C تمثل النسبة المئوية بالوزن للرطوبة ، الكربون، الهيدروجين، الأكسجين، النيتروجين، الكبريت فى الوقود على التوالى.

فإن إجمالى O_2 اللازم للإحتراق الكامل للوقود

$$= C/12 + H/4 - O/32 + S/32 \quad Kmol/Kg \quad Fuel$$

$$= 0.224(C/12 + H/4 - O/32) N\, Nm^3/Kg \quad Fuel$$

الحجم النظرى المطلوب للهواء

$$A_0 = 4.76(C/12 + H/4 - O/32) Kmol/100Kg \quad Fuel$$

$$= \frac{4.76 \times 22.7}{100}\left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} + \frac{S}{32}\right)$$

$$= 0.089C + 0.267H + 0.033S - 0.033O\, Nm^3/Kg \quad Fuel$$

الحجم النظرى للغاز العادم (الغاز الرطب المنتج)

$$Y_0 = X + Y + Z$$

حيث:

$$X = Volume \quad Of \quad CO_2 Produced, Nm^3/KgFuel$$

$$= 22.4/100(C/12 + S/32) = 0.01866C$$

$$+ 0.007S\, Nm^3/KgFuel$$

$$Y = Volume\ \ Of\ \ H_2O\ Nm^3 / KgFuel$$

$$= 22.4/100(H/2 + H_2O/18)$$

$$= 0.112H + 0.012\,H_2O\ Nm^3 / KgFuel$$

$$Z = Volume\ \ Of\ \ N_2\ \ Nm^3 / KgFuel$$

$$= 0.79\,A_0 \frac{N \times 22.4}{28 \times 100}$$

$$= 0.79\,A_0 + 0.008\,Nm^3 / KgFuel$$

الحجم النظرى للغاز العادم الجاف:

$$V_0 = X + Z \frac{Nm^3}{KgFuel}$$

تحليل الغاز العادم النظرى (الرطب)/ نسبة مئوية

$$CO_2 = \frac{100X}{X+Y+Z}$$

$$H_2O = \frac{100Y}{X+Y+Z}$$

$$N_2 = \frac{100Z}{X+Y+Z}$$

- تحليل أورسات (Orsat) للغاز العادم النظرى (الجاف) نسبة مئوية

$$CO_2 = \frac{100X}{X+Z}, N_2 = \frac{100Z}{X+Z}$$

يتم حساب الهواء الزائد من تحليل الغاز العادم

نسبة الهواء الزائد للإحتراق الكامل

$$= \frac{100\,O_2}{0.27\,N_2 - O_2}$$

بالنسبة للإحتراق الغير كامل نسبة الهواء الزائد.

$$= \frac{100(O_2 - 0.5CO - 0.5\,H_2 - 2CH_4)}{0.27\,N_2 - (O_2 - 0.5CO - 0.5\,H_2 - 2CH_4)}$$

حيث :

كلا من O_2، CO، H_2، N_2 نسبة مئوية للمكونات فى الغاز العادم.

معامل الهواء الزائد (n):

$$n=\frac{A-A_0}{A}\times 100\, percent \quad Excess \quad Air$$

الهواء الذى تم الإمداد به : $KgFuel/Nm^3\ A_0(n+1)=A$

الغاز العادم المنتج $n\,A_0\,Nm^3/Kgfuel+V_0=V$

تحليل الغاز العادم

$$CO_2=\frac{100X}{V},H_2O=\frac{100Y}{V}$$

$$N_2=\frac{100(z+0.79)(A-A_0)}{V}$$

$$O_2=\frac{100nAB}{V}\times 0.21=\frac{21n\,A_0}{V}$$

الوقود الغازى : (Gaseous Fuels)

على فرض CO_2 ، CH_4 ، C_nH_{2n+2} ، C_nH_m ، H_2 ، CO ، N_2 تمثل الحجم أو نسبة الجزئ للمكونات فى غاز الوقود عند الإحتراق.

حجم الهواء القطرى، A_0=

$$A_0=0.0476[2CH_4+\frac{3n+1}{2}C_nH_{2n+2}+(n+\frac{m}{4})C_nH_m$$

$$-O_2+0.5Co+0.5\,H_2]\,Nm^3/Nm^3\,Fuel \quad Gas$$

حجم المنتج النظرى (V_0) من الغاز العادم الرطب.

$$V_0=X+Y+Z\,Nm^3/Nm^3\,Fuel \quad Gas$$

حيث :

X = حجم CO_2 المنتج،

Nm^3/Nm^3 لغاز الوقود الرطب =

$$0.01(CO_2+CH_4+nC_nH_m+nC_nH_{2n}+Co)$$

Y = حجم H_2O المنتج،

Nm^3/Nm^3 لغاز الوقود الرطب=

$$=0.01[2CH_4+(n+1)C_nH_{2n+2}+m/2C_nH_m+H_2]$$

Z = حجم N_2 لغاز الوقود الرطب=

$$= 0.01 N_2 + 0.79 A_0$$

الحجم النظرى للغاز العادم الجاف:

$$V_0 = X + Z \ Nm^3 / Nm^3 \ Fuel \ \ Gas$$

إذا كان الوقود الغازى محتوياً على كميات كبيرة من النيتروجين مثل غاز الإنتاج (Producer Gas)، وغاز الفرن العالى، فإن معادلة حساب الهواء الزائد نبنى على تحليل الغاز الجاف.

- للإحتراق الكامل:

النسبة المئوية للهواء الزائد = $\frac{100 \times O_2'}{0.27(N_2' - N_2'/V') - O}$

- للإحتراق الغير كامل:

النسبة المئوية للهواء الزائد =

$$= \frac{100(O_2 - 0.5CO + 0.5H_2' - CH_4')}{0.27(N_2' - N_2/V) - (O_2' - 0.5CO' - 0.5H_2' - 2CH_4')}$$

حيث الرموز ذات العلامة تبين النسبة المئوية للمكون فى الغاز العادم الجاف.

أقصى محتوى من CO_2 فى الغاز العادم الجاف :

محتوى CO_2 في الغاز الجاف النظرى ثابت تقريباً لدرجة معينة من الوقود. هذا هو أقصى محتوى من CO_2 فى الغاز العادم الجاف الناتج من درجة الوقود. قيمة أقصى (CO_2) أى (CO_2) النظرى يمكن كذلك حسابها من تحليل أورسات (Orsat) للغاز.

لإحتراق الكامل :

$$(CO_2)_{max} = \frac{100 CO_2}{100 - (O_2 + 376 O_2)} = \frac{100 CO_2}{100 - 476 O_2}$$

للحرق الغير الكامل:

$$(O_2)_{max} = \frac{100(CO_2 + CO + H_2)}{100 - 4.76(O_2 - 0.5CO - 0.5H_2 - 2CH_4)}$$

محتوى الغاز العادم من CO_2، O_2 من الإحتراق الكامل لنوع معين من الوقود يختلف مع الهواء الزائد بطريقة منتظمة. هذا موضح فى مخطط (Osrwald) المبين على المعادلتين السابقتين

لأقصى (CO_2) للوقود الذى له مخطط أوستوالد الخاص به. أقصى محتوى من CO_2 فى الغاز العادم لنوع معين من الوقود مع محتواه الحقيقى من CO_2 يمكن إستخدامه فى تعيين نسبة الهواء الزائد (n). وهذا طبقاً للعلاقات.

$$n = V_0 / A_0((CO_2)_{Theor} / (CO_2)_{actual}) -1$$

للوقود الصلب والسائل:

$$V'_0 / A_0 = 1$$

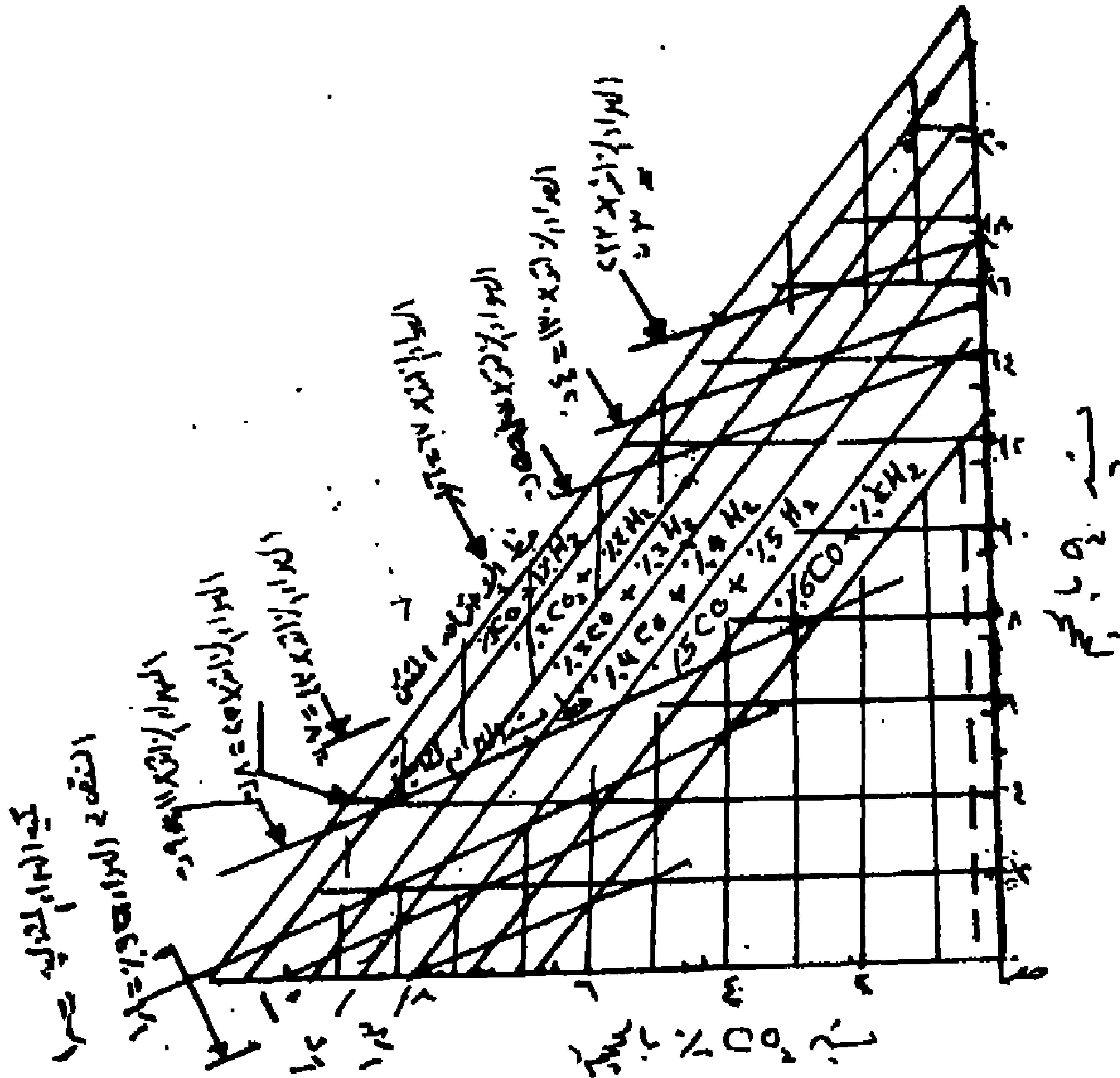
$$n = \frac{(CO_2)Theor}{(CO_2)actual} - 1$$

محتوى الغاز العادم الجاف من CO_2 نظريا:

محتوى الغاز العادم الجاف من CO2 غالباً يكون ثابتاً لدرجة معينة من الوقود وموضح كما يلى:

الوقود	أقصى CO_2، CO_2 النظرى كنسبة مئوية
الكوك عالى درجة الحرارة	20
الفحم البيتومين	18.7
اللجنيت والسيمى إنترثيت أنتراثيت ، سيمى كوك	19.5
الخشب – الفحم النباتى زيت الوقود/قار الوقود ، غاز المدينة	20.5
القيمة الحرارية الصافية (Net) = 4900 كيلو كالورى/NH^3	11
4450 كيلو كالورى / Nm^3	12
4000 كيلو كالورى/Nm^3	13
غاز فرن الكوك	11
غاز الإنتاج من الفحم	19
غاز الإنتاج من الكوك	20.5
غاز الوزن العالى	24.5

ولكن قيمة max (CO_2) السابق ذكرها قد تتغير قليلاً طبقاً لمكونات الوقود .



شكل (8): مخطط أو ستوالد لغاز فرن الكوك

النقطتين الحاكمتين على مخطط أو ستوالد هما max (CO_2)، max (O_2) الذى يكون 21 ٪ (أكسجين في الهواء). مكونات الغاز العادم المحتوى على الهواء الزائد موضح بنقطة على الخط الموصل للنقطنين الحاكمتين (خط الإحتراق الجيد Per Fact Combustion Line).. خطوط الإحتراق الغير كاملة فى مخطط أو ستوالد ممثله بمكونات H_2، CO فى الغاز العادم. خطوط ثبات نسبة الهواء تم حسابها كذلك فى المخطط.

$$\text{نسبة الهواء} \quad \frac{\text{الهواء النظرى}}{\text{الهواء الزائد}} = \frac{1}{1+n}$$

حيث :

n = معامل الهواء الزائد

في حالة معرفة (n) فإنه عندئذ يمكن حساب حجم الإمداد الحقيقي بالهواء (A) والغاز العادم الحقيقي المنتج (V). مخططات أو ستوالد مفيدة في مراجعة تحليل الغاز العادم وفي حسابات الإحتراق. كل غاز عادم يتم تمثيله بنقطة واحدة على المخطط المعنى بهذا الوقود تحديداً.

مخطط أوزوالد لغاز القرن الكوك للتحليل النموذجي الآتي (بالحجم) موضح بالشكل (8).

H_2	=	% 47.3	،	CH_4	=	٪ 34.2
CO	=	% 6.9	،	C_2H_4	=	٪ 2.6
CO_2	=	% 2.2	،	O_2	=	٪ 0.3
0.6	=	% N_2	،	0.5	=	٪ H_2S

أهمية نسبة CO_2 في الغاز العادم:

الغاز العادم المنتج من أى وقود عند إحتراقه بكمية الهواء النظرية (بدون أى زيادة) يحتوى نسبة ثابتة ومميزة من CO_2 (تعرف بالنسبة النظرية لـCO_2 والتى هى كذلك أقصى نسبة CO_2 التى يمكن أن يحصل عليها الغاز.

عند حرق كربون نقى جاف بالهواء النظرى، فإن أكسجين الهواء يتم إستبداله كمياً بواسطة CO_2، بحيث أن تصبح نسبته النظرية 21 ٪ بالحجم. أى هواء زائد يتم الإمداد به بالإضافة إلى المطلوب نظرياً لأى نوع من الوقود يقلل CO_2 % فى الغاز العادم بالتناسب.

نسبة CO_2 النظرية المستخدمة فى الحسابات هى على أساس الجفاف ذلك لأنه عملياً تتحدد نسبة CO_2 % فى الغاز العادم بأحد أشكال أجهزة تحليل الغاز (مثل جهاز Crast) التى يتم فيه تخزين الغاز وتحليله فوق محاليل من المواد الكاشفه فى الماء عادة ، محتواه من بخار الماء يكون صغيراً (1.3 ٪ عند 15 °م) ويكون ثابتاً أثناء التعيين، بحيث أن النتيجة المتحصل عليها هى CO_2 ٪ الحجم على أساس الجفاف.

نسبة CO_2 % النظرية للوقود المحتوى على غازات الهيدروجين أو الهيدروكربون تكون أقل من ذلك للكربون ذلك لأن إمداد الهواء يحرق الهيدروجين لتكوين الماء الذى يتكثف، تاركاً النيتروجين لتخفيف الغاز العادم المتكون من الكربون فقط. SO_2 الموجود فى الغازات العادمه يتم تحليله وتقريره ك CO_2 (فى جهاز أورسات) ، ولكن هنا يدخل فقط خطأً صغيراً فى الوقود ذو

المحتوى المنخفض من الكبريت. أى أول أكسيد الكربون ينتج ويقلل نسبة CO_2 المتكونه ويجب السماح به عند معرفة الكمية.

الهواء الزائد للحرق كدلالة لنسبة CO_2 % في الغاز العادم للفحم، وغاز الفرن العالى من زيت الوقود، وغاز فرن الكوك، حيث المكونات طبقاً للجدول التالى:

جدول: الهواء الزائد للحرق بدلالة CO_2 % :

CO2	الفحم		زيت الوقود	
	٪ الهواء الزائد	هواء الإحتراق م3	٪ الهواء الزائد	هواء الإحتراق م3
1	2	3	4	5
18.7	صفر	8.81	–	–
18	2.9	9.08	–	–
17.5	5.8	9.32	–	–
17	9.7	9.66	–	–
15.4	–	–	صفر	11.01
15	34	10.92	2.4	11.28
14	32	11.62	9.4	12.06
13	43	12.6	17	12.9
12	55	13.65	26	13.9
11.8	–	–	–	–
11.55	–	–	–	–
11	68	14.8	37	15.1
10	84	16.2	53	16.85
9	105	18.05	74	19.2
8	130	20.25	87	20.6
7	162	23.1	112	23.4
6	20.3	26.7	146	27.01
5	265	32.3	194	32.4
4	350	39.6	267	45.05

$\%CO_2$	غاز الفرن العالى		غاز الفرن الكوك	
	٪ الهواء الزائد	هواء الإحتراق م3	٪ الهواء الزائد	هواء الإحتراق م3
1	2	3	4	5
25.1	صفر	0.687		
25	1	0.693		
23	21	0.825		
21	43	0.98		
19	70	1.17		
17	105	1.4		
15	148	1.7		
13.97	–	–		
13.71	–	–		
13	205	2.09		
12	240	2.4		
11	281	2.62		
10	332	2.97		
9.4			صفر	4.1
9	393	3.387	4	4.27
8	470	3.92	16	4.75
7	567	4.58	31	5.37
6	700	5.497	51	6.2
5	883	6.75	81	7.42
4	1160	8.64	126	9.11

معادلات تجريبيه لحساب الحجم القطرى للهواء وللغاز العادم:

من المعلومات عن القيمة الحرارية الصافية (Net) للوقود (والتى لها علاقة بالقيمة الحرارية الكلية (Gross)، يمكن حساب مطالبهم النظرية من الهواء والحجم النظرى للغاز العادم الذى ينتجونه باستخدام العلاقات الإستاتيكية الموضحة كالآتى:

تحويل القيمة الحرارية الكلية (Gross–6) إلى القيمة الحرارية الصافية (N-Net) للوقود الصلب، كيلو كالورى / كيلوجرام.

الفحم: $C_G=C_N0.954+110$

الكوك : $C_G=C_N-40$

الوقود السائل كيلو كالورى / كيلو جرام

2000+0.75 CG=CN

الوقود الغازى كيلوكالورى / Nm3

غاز الإنتاج: 0.95 CG=CN

غاز الماء : 0.915 CG=CN

غاز الفرن العالى: 0.99 CG=CN

غاز فرن الكوك: 0.895 CG=CN

حساب A0 (الهواء القطرى اللازم للحرق)، V0 (الحجم النظرى للغاز العادم المنتج، يمكن عمله باستخدام المعادلات الآتية:

جدول (1) : المعادلات لحساب A0 ، V0:

نوع الوقود	Nm3/ كجرام(للوقود الصلب والسائل)، Nm3/ Nm3 للوقود الغاز	
	الهواء المطلوب نظرياً (A0)	الحجم القطرى للغاز العادم (V0)
الوقود الصلب		
$C_N < 5500 Kcal / Kg$	$0.01 \times \frac{C_N}{1000} + 0.5$	$0.89 \times \frac{C_N}{1000} + 1.65$
$C_N > 5500 Kcal / kg$	$1.01 \times \frac{C_N}{1000} + 0.55$	$\frac{C_N}{1000} + 0.9$
الوقود السائل	$0.85 \times \frac{C_N}{1000} + 2$	$1.11 \times \frac{C_N}{1000}$
الوقود الغازى		
غاز الإنتاج	$0.875 \times \frac{C_N}{1000}$	$0.6401 \times \frac{C_N}{1000} + 1.11$
غاز الماء، غاز الماء المكربن، غاز فرن الكوك	$1.09 \times \frac{C_N}{1000} - 0.25$	$1.35 \times \frac{C_N}{1000} - 0.67$
غاز الفرن العالى	$0.795 \times \frac{C_N}{1000}$	$0.634 \times \frac{C_N}{1000} + 1$
الغاز المخلوط (غاز الفرن العالى + غاز فرن الكوك)	$0.07 \times \frac{C_N}{1000} - 0.16$	$1.04 \times \frac{C_N}{1000} + 0.7$

الهواء الأولى والثنائي: (Primary And Secondary Air)

الهواء الذى يصل إلى طبقة كتلة الوقود واللازم لإحتراق الكربون المثبت للفحم أو إحداث التأثير للجزء الأول من عملية إحراق الوقود يسمى الهواء الأولى. فى حالة حرق الوقود المطحون، الوقود السائل، الوقود الغازى، فإن الهواء الأولى يعمل كذلك كحامل لهذه الأنواع من الوقود إلى الفرن حيث يختلط الهواء مع الوقود. فى حالة كتل الوقود الصلب، فإنه يمر خلال طبقة الوقود.

باقى الهواء الضرورى لإكمال الإحتراق يسمح به منفصلاً فى الفرن ويسمى الهواء الثنائى.

الهواء الثنائى يساعد فى إكمال الإحتراق للمادة المتطايرة (مثل الدخان) المنبعثه من الوقود الصلب خلال المرحلة الأولى من الإحتراق، الهواء الثنائى عادة يسمح بدخوله فوق طبقة الوقود.

لذلك فإن الإحتراق الكامل للوقود الصلب يتم إستخدام كلا من الهواء الأولى والثنائى. الإحتراق الكفؤ يحدث بالنسبة الصحيحة لكلا نوعى الهواء. الدخان القادم من المدخنه يرجع أساساً إلى قلة الإمداد للهواء الثنائى.

نقطة الندى للغازات العادمة وتأثير الكبريت والرماد فى الوقود:

تدفقات الغازات العادمة خلال المواسير والأجزاء الأخرى للفرن، حيث يكون من الخطورة وجود ترسيبات من المياه عليها. معرفة نقطة الندى للغازات العادمة يكون لذلك هاماً.

نقطة الندى لخليط غازى هى درجة الحرارة التى عندها يبدأ بخار الماء لهذا الخليط فى التكثيف، أى درجة الحرارة التى عندها ضغط التشبع للماء يساوى الضغط الجزئي لبخار الماء فى خليط الغاز.

معظم أنواع الوقود تحتوى على كبريت إلى درجة ما. الإزالة الكاملة للكبريت من بعض أنواع الوقود ممكن من الناحية التقنيه ولكنها غير مجديه إقتصادياً. وجود الكبريت فى الوقود دائماً يسبب ثلاث مشاكل رئيسية:

- تآكل أنابيب التغذية حول مدخنه الفرن (Economizers) والمسترجعات التى هى منظومة للإستفادة من حرارة الفرن عند درجة الحرارة المنخفضة.
- الترسيبات والتآكل عند درجات الحرارة العالية لتجهيزات التحميص والأنابيب والمعدات الأخرى فى مسار الغاز العادم.
- التلوث الجوى نتيجة توليد SO_2، SO_3.

تركيز SO_3 فى الغاز العادم مرتبط بالكبريت. محتوى الوقود الذى يتراوح ما بين 0.0012 ٪ بالحجم لثالث أكسيد الكبريت للوقود الذى يحتوى 1٪ كبريت إلى حوالى 0.004 ٪ بالحجم من SO_3 للوقود الذى يحتوى على 5٪ كبريت. أثناء الإحتراق يتحول الكبريت فى الوقود إلى SO_2

والذى يكون عدوانياً فى وجود الكبريت وهو المسئول الرئيسي عن التآكل عند درجة الحرارة المنخفضة. تقريباً 1٪ من SO_2 يتحول إلى SO_3 فى الظروف العادية من الهواء الزائد العالى ولكن يزداد أكثر عند درجة حرارة الغاز المرتفعة فى وجود العامل الوسيط وذلك عندما يعمل كلا من أكاسيد الفاناديوم فى رواسب الرماد وأكاسيد الحديد على أسطح المعدن كعامل وسيط، فى وجود الأكسجين الكافى لتحويل SO_2 إلى SO_3. مع زيادة محتوى الوقود من الكبريت، فإن نقطة الندى للحامض تزداد كذلك والتى تعيق إستعادة الحرارة من الغاز العادم بهدف حماية المعدة من التآكل والتلف.

نسبة الكبريت ٪ فى الوقود	نقطة الندى للحامض
%1	130 °م
%5	145°م

درجة حرارة الغاز العادم الخارج من المدخنه تكون دائماً أعلا من نقطة الندى للحامض.

نقطة الندى النظرية للماء هى تقريباً 45°م. القدرة على إستنتاج نقطة الندى للحامض لحالات معينة يصبح معيناً فى توقع المشاكل وإتخاذ إجراءات تفادى حدوثها. الفناديوم يوجد مع معظم المخلفات المتبقية للزيوت والرماد أثناء الحرق. لا توجد طرق إقتصادية لإزالة الفناديوم من مخلفات زيت الوقود. كلا من الفناديوم والصوديوم يمكن أن يسبب التآكل وترسيبات لأجزاء وحدة التحميص (Super Heaters) فى الغلايات، وريش التربينات الغازية ، المسترجحات للحرارة الفاقدة حيث درجات حرارة التشغيل تزيد عن 650°م.

عند الإحتراق تكون هذه العناصر رواسب رماد ذات درجة حرارة إنصهار منخفضة على أنابيب وحدة التحميص، والدعامات ، حمالات التعليق... إلخ، كما تحدث ترسيبات من الرماد على مسار الغاز الهوائى . أكسيد الفناديوم يلتصق على الأسطح المعدنية الباردة، والتى تعزل الأنابيب محلياً، وتعيق الإنتقال الحرارى، حيث تصبح الطبقة الخارجية أكثر سخونه.

يلي ذلك احتجاز نسبة أكبر من الرماد والذى يعيق مرور العادم مسبباً ترسيبات فى الأنابيب.

وكثير من المصانع توجد مشاكل إنبعاث الحامض من المدخنه. عند إقتراب درجة حرارة الغاز العادم من نقطة الندى للحامض وحدوث التكثيف، فإن حبيبات الرماد تتراكم وتخرج من المدخنه. سقوط الرواسب الحامضية يمكن أن يسبب التلف للمنشآت والمركبات وكذلك الحاصلات الزراعية.

قوانين التحكم فى التلوث . تحدد الحدود الدنيا لثانى أكسيد الكبريت، سواء باستخدام وقود ذو محتوى منخفض من الكبريت أو بتوفير أجهزة التحكم فى إنبعاث SO_2 فى الجو.

الهواء الأولى والثنائى (Primary and Secondary Air)

الهواء الذى يتخلل طبقة كتلة الوقود واللازم لحرق الكربون المثبت للفحم أو لإحداث الجزء الأول من عملية حرق الوقود يسمى الهواء الأولى. فى حالة حرق الوقود المطحون، الوقود السائل، الوقود الغازى، فإن الهواء الأولى يعمل كذلك كحامل لهذه الأنواع من الوقود حيث الخلط المسبق معها. فى حالة كتل الوقود الصلب فإنه يمر خلال طبقة الوقود.

باقى الهواء اللازم لإكمال الإحتراق يسمح له بالدخول منفصلاً فى الفرن ويسمى الهواء الثنائى.

الهواء الثنائى يساعد فى إحتراق المادة المتطايرة (مثل الدخان) التى إنتزعت من الوقود الصلب أثناء المرحلة الأولى للإحتراق. يدخل الهواء الثنائى فوق طبقة الوقود.

لذلك فإن الحرق الكامل للوقود الصلب يتم بإستخدام كلا من الهواء الأولى والهواء الثنائى. حدوث الإحتراق بكفاءة تامة يعتمد على النسبة العادية لكلا نوعى الهواء. الدخان الخارج من المدخنه يرجع أساساً إلى قلة الإمداد للهواء الثنائى.

الدخان – الأسباب والعلاج (Smoke – Causes and Remedy)

الدخان يكون بسب الإحتراق الغير كامل للمادة المتطاير ويتكون أساساً من مادة القار، جسيمات الكربون وأملاح الأمونيا. الآتى هو أسباب تكون الدخان:

- يتكون الدخان عندما تكون كمية الهواء الثنائى للإحتراق الكامل غير كافيه لإحتراق المادة المتطايرة.
- كذلك يتكون الدخان عندما يكون الخلط بين الهواء والمادة المتطايرة ليس جيداً أو متقناً.
- زيادة الهواء تسبب الدخان بخفض درجة حرارة الغازات القابله للإحتراق إلى أقل من درجة حرارة إحتراقها. لذلك فإنه لا يحدث إشتعال أو حرق تلك الغازات القابلة للإحتراق حيث تمر نحو المدخنه بدون حرق مسببه الدخان.
- بالإلتصاق مع سط بارد، يفقد الدخان حرارته ويمكن عدم حدوث الإحتراق والنتيجة هى إنتاج الدخان.

الآتى هى طرق تجنب الدخان:

- يمكن تجنب الدخان بإمداد الهواء الثنائى للإحتراق الكامل.
- الخلط المتقن للغازات القابلة للإحتراق مع الهواء.

- التسخين المسبق للهواء الثنائي.
- توفير المساحة (الفضاء) الكافى للإحتراق.

الأكسجين الحر فى الغاز العادم لمختلف أنواع الوقود:

غاز فرن الكوك	الفحم الغازي	حبيبات الفحم	منخفض الكبريت	قار الفحم	زيت الفرن	غاز الفرن العالي	غاز الإنتاج	غاز محول	غاز مخلوط (الحم الكوك + غاز المحول) نسبة غاز المحول (%)					
									10	20	30	40	50	60
2.07	1.97	1.95	2	1.95	2	0.95	1.26	1.25	2.02	1.97	1.92	1.86	1.8	1.72
2.76	3.59	3.57	3.64	3.56	3.65	1.82	2.38	2.36	3.68	6.31	3.52	3.42	3.31	3.18
5.12	4.96	4.94	5.02	4.92	5.03	2.62	3.36	3.36	5.08	4.98	4.87	4.6	4.6	4.43
6.38	6.12	6.1	.6.2	6.08	6.21	3.35	4.23	4.25	6.27	6.16	6.02	5.88	5.71	5.52
7.41	7.13	7.1	7.22	7.09	7.22	4.03	5.04	5.04	7.29	7.17	7.03	6.87	6.69	6.46
8.3	8.01	7.98	8.11	7.96	8.11	4.66	5.75	5.77	8.18	8.05	7.9	4.74	7.55	7.33
9.78	9.46	9.44	9.56	9.42	9.57	5.8	7.01	7.05	9.65	9.52	9.36	9.19	8.98	8.74

الوقود مقابل متطلبات الهواء وإنتاج الغاز العادم

الوقود	متطلبات الهواء						منتجات الحريق					
	النظرى		حجم الهواء مع نسب هواء زائد مختلفة Nm3/Kg				النظرى		حجم الغاز العادم بنسب مختلفة من هواء زائد Nm3/Kg			
	Kg/Kg	Nm3/Kg	10%	20%	30%	40%	Kg/Kg	Nm3/Kg	10%	20%	30%	40%
الوقود الصلب												
فحم الكوك	9.88	7.35	8.09	9.56	11.03	14.3	10.55	7.62	8.35	9.83	11.3	14.97
فحم البخارى	9.31	6.92	7.61	8.99	10.29	13.84	10	7.22	7.91	9.29	10.67	14.84
فتات الفحم	7.59	5.64	6.2	7.32	8.44	11.28	8.17	5.88	6.44	7.56	8.68	11.52
الفحم الغازى	9.91	7.37	8.11	9.59	11.07	14.74	10.64	7.71	8.45	9.93	11.41	15.08
فحم غير الكوك	7.77	7.26	7.99	9.45	10.91	14.52	10.48	7.64	8.19	9.65	11.11	14.72
كوك	8.49	6.31	6.94	8.2	9.46	14.62	9.2	6.4	6.03	8.29	9.55	12.71
الوقود السائل												
قار الفحم	12.28	9.12	10.03	11.85	13.67	18.24	13.22	9.67	10.18	12	12.82	18.39
منخفض الكبريت	14.04	10.42	11.46	13.54	15.62	20.84	15.01	11.14	12.18	14.26	16.24	21.56
زيت الفرن	13.7	10.2	11.22	13.26	15.3	20.4	14.63	10.79	11.81	13.85	15.85	20.99
الوقود الغازى	Nm3/Nm3						رطب	جاف	حجم الغاز العادم			
غاز فرن الكوك	-	4.2	4.62	5.46	6.3	8.4	4.9	3.48	5.32	6.16	7	9.1
غاز الفرن العالى	-	0.7	0.77	0.91	1.05	1.4	1.55	1.51	1.62	1.76	1.9	2.25
غاز الإنتاج	-	1.15	1.27	1.51	1.75	2.3	1.99	1.78	2.1	2.33	2.56	3.14

غازات المدخنة والتيار الهوائي (Chimney Gases and Draught)

غازات المدخنة التي تصرف إلى الجو خلال المدخنه تحتوى علىCO، CO_2، N_2، O_2... إلخ.

الضغط اللازم لإمداد الفرن بالهواء ولإزالة الغازات العادمة من الفرن يسمى التيار الهوائي (Draught). وهو يقاس بالمليتر لعداد الماء الذى هو إرتفاع الماء فى أنبوب القياس حرف (U) المكافئ للضغط فى الفرن – يوجد نوعين وهما التيار الهوائي الطبيعي، والتيار الهوائي الصناعى (أو السحب الميكانيكي للهواء).

تيار الهواء الطبيعي:

تيار الهواء الطبيعي يتم إنتاجه بواسطة المدخنه. التدفق الناتج لغاز المدخنه يتم التحكم فيه بواسطة مخمد (Dampers). تيار الهواء الطبيعي الذى ينتج بواسطة المدخنه يكون متناسباً مع إرتفاع المدخنه ومع كثافة غاز المدخنه. هذا يعنى أن زيادة طول المدخنه وزيادة سخونه غاز المدخنه ينتج تيار هواء أكثر. كلا الطريقتين للحصول على تيار هواء أكثر يكون مكلفاً بسبب الآتى:

1. إرتفاع تكلفة المدخنه الطويله.
2. حقيقة أنه لخلق تيار هواء فإنه يلزم تسخين غاز المدخنه الذى يمكن الإستفادة به في استخدامه فى رفع درجة حرارة البخار أو أى أغراض تسخين أخرى.

طول المدخنه المطلوب لتيار هواء معين (ودرجة الحرارة) يتم حسابه من المعادلة الآتية:

$$H = h / \frac{7.6}{t_a + 460} - \frac{7.2}{t_g + 4.60}$$ حيث

H= إرتفاع المدخنه بالقدم

h = تيا الهواء المطلوب ، بوصات لعداد الماء

7.00= وزن 100 قدم مكعب من الهةاء عند 30 درجة فهرنهيت

7.9= وزن 100 قدم مكعب من غاز المدخنه عند 60 درجة فهرنهيت

t_a = درجة حرارة الهواء (درجة فهرنهيت)

t_g = درجة حرارة الغاز (درجة فهرنهيت)

فى حالة عدم معرفة متوسط درجة حرارة الغاز العادم، فإنه يمكن حسابها تقريباً بطرح 2 درجة فهرنهيت من درجة الحرارة عند قاعدة المدخنه لكل 3 قدم من إرتفاع المدخنه.

في الحقيقة المدخنه هى التجهيزه التى يتم فيها سحب الهواء بواسطة استخدام جزء من حرارة الإحتراق للوقود، وتعتمد في أدائها على حقيقة أن وزن عامود من الغازات العادمة خلال المدخنه يكون أقل من وزن عامود مساوى من الهواء البارد خارج المدخنه، القوة الدافعه هى الفرق بين الإثنين.

يمكن حساب إرتفاع المدخنه بالبديل الآتي:

تيار الهواء الحقيقي الطبيعي = تيار الهواء النظرى الناتج بواسطة فرق الضغط بين الأعمدة المتساوية لكل من الهواء الجوى البارد والغازات العادمة – الفقد فى الضغط في التدفق بسبب الإحتكاك.

$$D=(P_g-P_a)H-(FV^2/2g)$$

حيث:

D= تيار الهواء كجرام/المتر المكعب ≈ عامود الماء بالمليميتر

P_g،P_a = هما كثافات الهواء والغاز العادم (كثافة الغاز يتم حسابها عند متوسط درجة الحرارة للمدخنه).

H = إرتفاع المدخنه بالمتر.

F = معامل الإحتكاك 1+0.9H/d=

(حيث d= قطر المدخنه بالمتر)

V = سرعة الغاز العادم الخارج، متر فى الثانية

سرعة الغازات العادمة تزداد باضطراد مع متوسط درجة حرارتها (بنسبة مباشر للجذر التربيعي للفرق فى درجة الجرارة) حيث الكثافة تقل . لذلك، فإن نيار الهواء يتناسب مع إرتفاع المدخنه ويزداد مع درجة حرارة الغاز العادم.

- طاقة المدخنه لمرور الغازات تتغير مباشرة مع مساحة المقطع ولكن فقط مثل الجذر التربيعي للإرتفاع.
- رغم أن تيار الهواء الممكن يزداد مع درجة حرارة الغازات، فإنه لا يكون هناك زيادة فى الطاقة بعد وصول متوسط درجة الحرارة إلى $(2t_a+273^{\circ}C)$ حيث (t = درجة حرارة الهواء). طاقة المدخنه لتمرير الغاز يكون عند أقصاه عندما يكون متوسط درجة الحرارة خلالها 315°م.

تيار الهواء الصناعى (أو الميكانيكي):

تيار الهواء الطبيعي للمدخنه يكون مقيداً بعوامل عملية، حيث أن تيار الهواء للأفران الضخمة يكون عادة إمداده بواسطة مراوح والتى تسمى تيار الهواء الصناعى أو الميكانيكي. تيار الهواء الطبيعي يعمل كله بالإمتصاص (Suction)أى أن المدخمه تمتص أو تسحب تدفق الهواء أو الغازات خلال الفرن، بخلاف المروحة، فإنه يتم خلق تيار الهواء الصناعى كذلك بواسطة باثق البخار (Steam Gat ejector) .

تيار الهواء المستحث أو المسحوب: (Induced Draught)

فى هذا النظام يتم وضع مراوح السحب عند قاعدة المدخنه لتعزيز تيار الهواء الطبيعي للمدخنه. تيار الهواء من مروحة الإمتصاص يتغلب على مقاومة طبقة الوقود لمرور الهواء الأولى ومقاومة منشأ الفرن لسحب الهواء الثنائى فوق طبقة اللهب. فى هذه الحالة يعمل الفرن تحت الإمتصاص.

تيار التهوية بالسحب الآلى أو (القسرى) (Forced Draught)

فى هذا النظام يتم وضع مروحة أسفل أو أمام المصبعة الحديدية (Grate) لدفع الهواء الأولى خلال طبقة اللهب والهواء الثنائي فوق المصبعة. الفرن يعمل تحت الضغط فى هذه الحالة.

المميزات والعيوب النسبية للتيار المستحث أو المسحوب والتيار بالسحب الآلى كالآتي:

<u>مميزات تيار الهواء الصناعى مقارنة بالتيار الطبيعي هو كالآتي:</u>

- يمكن إستخدام فحم ذو نوعية متدنية وأرخص فى السعر.
- زيادة كفاءة الإحتراق حيث يمكن تخفيفها بسهولة بسبب زيادة سهولة التحكم فى الهواء.
- سهولة التحكم فى الفرن.
- يمكن إستخدام مدخنه أصغر.

<u>تيار الهواء الصناعى له ثلاث أنواع:</u>

- تيار الهواء المستحث (المسحوب).
- تيار الهواء بالسحب الآلى (القسرى).
- تيار الهواء المتوازن مع الضغط الجوى.

تيار الهواء المتوازن مع الضغط الجوى: (Balanced Draught)

يتم تركيب مروحة واحدة عند قاعدة المدخنه والآخرى عند الأطراف الأمامية لنظام الفرن.تأثيرات الضغط والإمتصاص (السحب) لمروحة تيار الهواء القسرى ومروحة تيار الهواء المسحوب (المستحث) على التوالى يتوازن فى الفرن الذى يعمل عند أو قريباً من الضغط الجوى.

المميزات النسبية لتيار الهواء القسرى ونظم تيار الهواء المسحوب (المستحدث):

تيار الهواء المستحث	تيار الهواء الجوى
1. الفرن يعمل تحت المص لذلك يتسرب الهواء إلى داخل الفرن يقلل من الكفاءة والحرارة	1.الفرن يعمل تحت ضغط لذلك فإن الغاز يتسرب خارج الفرن مسبباً فقد قليل فى الكفاءة الحرارية، كذلك توجد خطورة من التفجر والإندفاع خلال أبواب اللهب الأمامية
2. المروحة تعمل ساخنه بما يجعل إحتمال التآكل وعدم التوازن بسبب تراكم الرواسب	2. المروحة تعمل باردة لذلك فإنه لا يحدث تآكل أو ترسيبات بما يزيد من عمر إستخدامها.
3. قوة حصان أكبر مطلوبة للمروحة بسبب كبر حجم الغازات التى يتم تداولها	3. تعطى سيطرة أفضل لتوزيع الهواء ومعدلات أعلا للإحتراق مقارنة بالتيار الهوائى المستحث.

أفضل ظواهر النظامين يتم الحصول عليه بتيار الهواء المتوازن.

كمية تيار الهواء المطلوبة تتوقف على:

- طبيعة الهواء.
- عمق اللهب اللازم إستمراره.
- معدل الإحتراق المطلوب.
- تصميم غلايه الفرن أو تصريف الغاز (المدخنه).
- المقاومة المستركة لستلزمات المحطة مثل المقتصدات وهى أنابيب التغذية حول مدخنه الفرن، سخانات الهواء، المجددات، غلايات الفاقد الحرارى، منظومة الإستفاده من حرارة الفرن المنصرفه (Recuperates).

خواص اللهب : (Flame Characteristics)

اللهب هو خليط إحتراق (أو ناتج إحتراق) غاز قابل للإحتراق أو بخار وهواء. الوقود الصلب يحترق بتوهج ولكن مع لهب قليل.

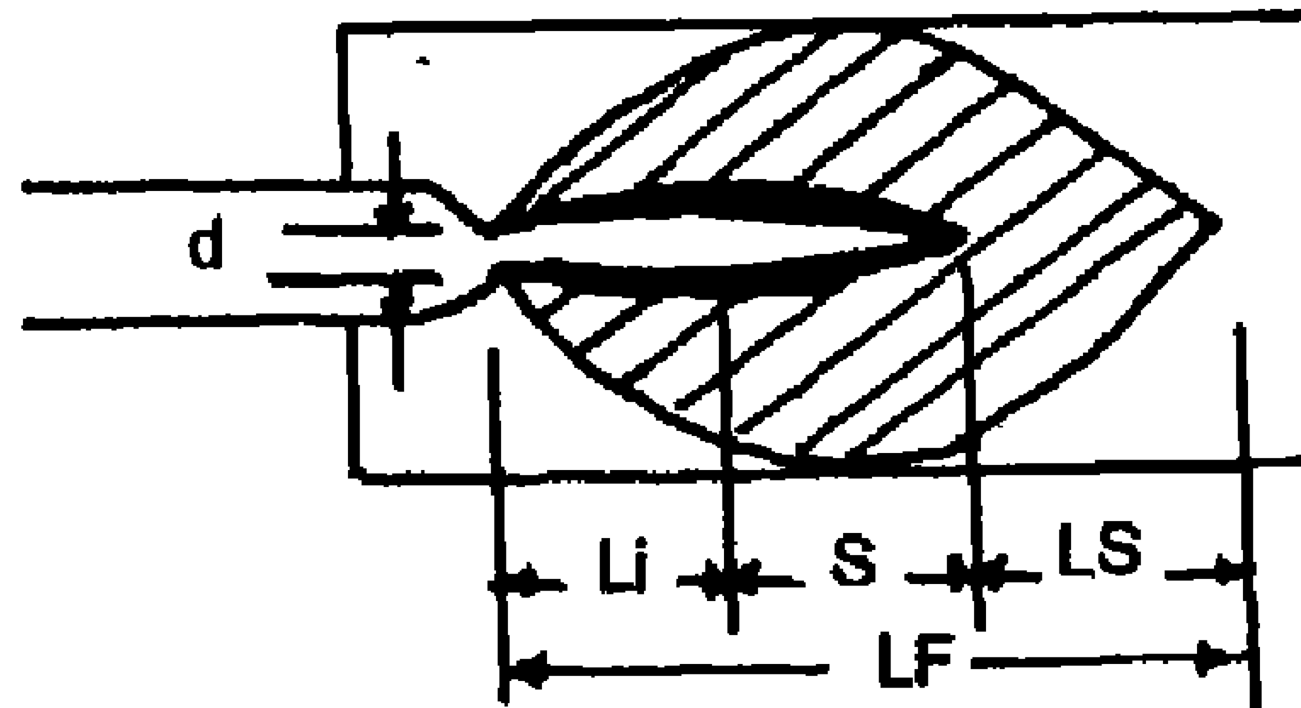
الأنواع الرئيسية للهب هى :

- اللهب اللامع – مثل الشمع ، الزيت ، القار ولهب غاز فرن الكوك.
- اللهب الغير لامع مثل الهيدروجين ، أول أكسيد الكربون ، غاز الفرن العالى.
- اللهب الطويل (الكسول) ، مثل اللهب ذو التهوية الجزئية. ينتج عند إحتراق الغازات بكمية أقل من الهواء الأولى – تدفق غير مضطرب.
- اللهب القصير (الكثيف) مثل اللهب شديد التهوية ، يتم إنتاجه عند حرق الغاز بكمية كبيرة من تيار الهواء كما فى حالة أنبوب النفخ (Blow Pipe). الهواء والغاز يتم خلطهم جيداً ودفعهم بسرعات عاليه مع تدفق بضطراب.

بناء اللهب : (Flame Structure)

يتوقف حجم وشكل اللهب على نوعه أى الخلط المسبق والتسرب ، التدفق المضطرب أو الرقائقي وكذلك على أبعاد الموقد.

اللهب السابق خلطة (Premixed Flame) لموقد الغاز البسيط موضح فى الشكل (9).



شكل (9): لهب سابق خلط لموقد الغاز البسيط

حيث :

d= قطر فتحة بزبوز الموقد.

Li = المسافة التى تحولت بالإحاطة الأولية للهب والتى تسمى منطقة الإشتعال (إرتفاع العمق الداخلى).

$L_f = L_s = S + L_i$ الطول الكلى (وهو يبين منطقة الإحتراق الكامل) منطقة الإشتعال محددة بدقة (فى اللهب الرقائقى) ولها سطح رقيق(واجهة اللهب). واجهة اللهب تتشتت فى

حالات الإضطراب لها عرض تقريبي موضح بالرمز (δ). عرض واجهة اللهب (δ) يزداد في الإنتشارية الدواميه (Eddy Diffusivity)، ويقلل من سرعة اللهب العادية.

L_s = المسافة بين الواجهة الأمامية المرئية وطرف اللهب (وهى تمثل الحدود للإحتراق الكامل ومرتبطة أساساً بالخواص الحركيه للخليط المحروق).

الإحتراق يكون أبطأ في المنطقة (L_S) حيث يحدث تسرب لبعض الهواء من الجو، ولكن يكون كثيفاً عند مقدمة اللهب.

δ= صفر للهب الرقائقي السابق خلطه أى $L_S+L_i=L_f$

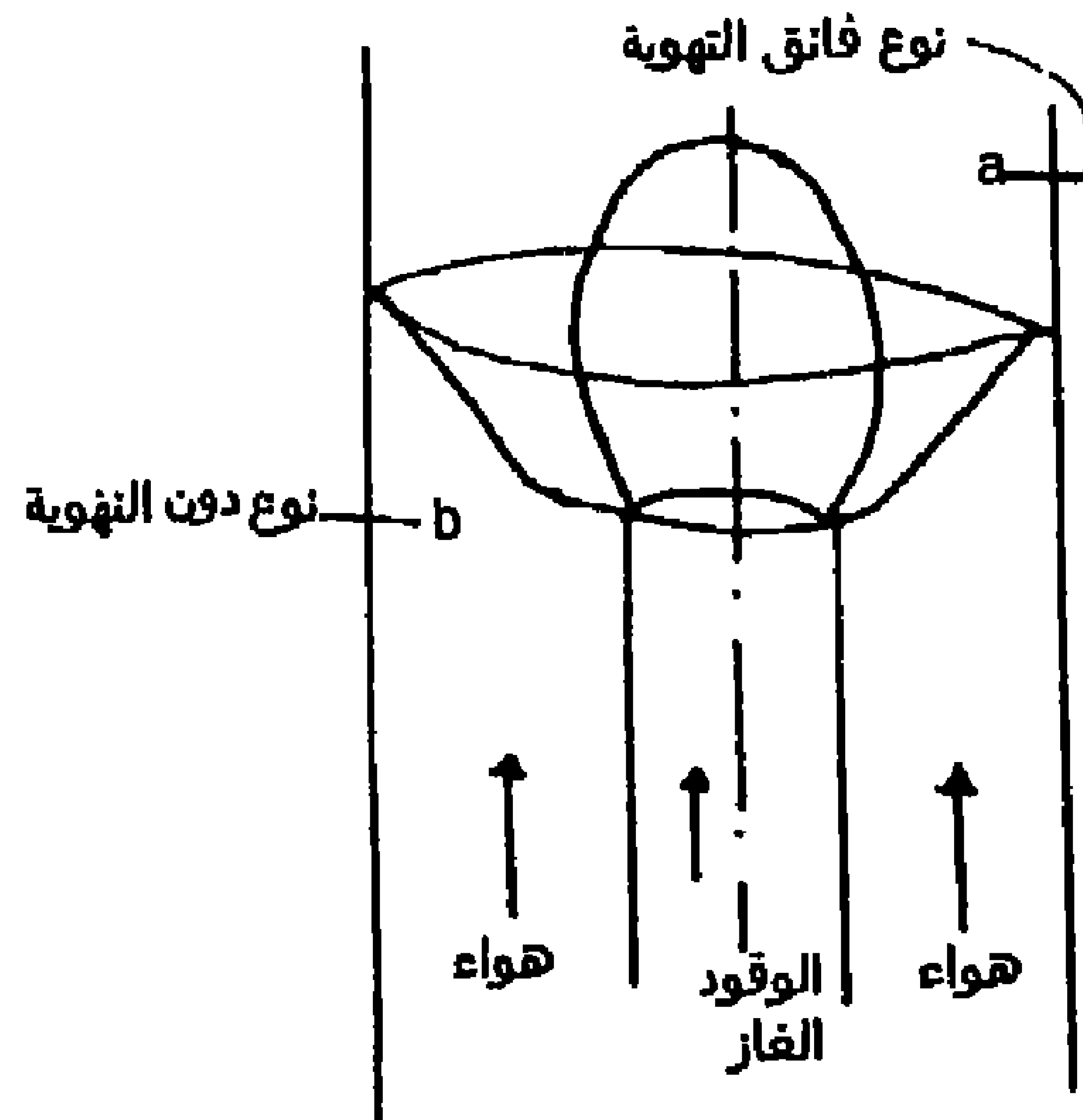
(L_i) تزداد بالزيادة في متوسط سرعة الغاز الطوليه عند بزبوز (فنية) الموقد(V_1) مع نصف قطر أنبوب الفنيه (r) وتقلل في سرعة إنتشار اللهب (V).

$$L_i=\frac{V_1\times r}{V}$$

في حالة اللهب المضطرب، فإن سرعة إنتشار اللهب المضطرب تساوى تقريباً سرعة الغاز (أى $V=V_1$) ولذلك فإن (L_i) المضطرب $\simeq$ r.

إرتفاع القمع الداخلي يظل ثابت غالباً للهب المضطرب (Turblent) بينما يزداد مع الزيادة في سرعة الغاز للهب الرقائقي.

في حالة اللهب الرقائقي البسيط المنتشر في الشكل (10) ، فإن تدفق الوقود الغاز وتدفق الهواء (بنفس السرعة) ومنفصلين خلال أنابيب متحدة المركز، الأنبوب الداخلي لإمداد بثق الوقود.



شكل (10): لهب الإنتشار الرقائقي البسيط

عملية خلط الغاز – الهواء (التي تتم إما بالإنتشار الجزيئ او بالإنتشار الدوامي طبقاً للظروف الرقائقية أو المضطربه للهب) تحدد بناء إنتشار اللهب (ليس سرعة إنتشار اللهب).

عندما يكون الهواء زائداً فإنه يتكون نوع التهوية الزائدة النوع (a) فإنه يتكون لهب منتشر رقائقي (Laminar Diffusion Flame). ومع زيادة غاز الوقود فإن اللهب يجبر ليكون تحت التهويه النوع (b). حدود اللهب تتوفر به بواسطة السطح الذى عنده يكون الإحتراق كاملاً. يفترض أن يكون كلا من الوقود والهواء بنسب متكافئة العناصر (Stiochiometric Ratio) عند حدود السطح.عندما يكون الهواء زائداً، فإن السطح يقترب فى اتجاه المحور مع إستمرار تسرب الغاز والهواء. طول اللهب يقابل حالة وصول الهواء الكافى عند الطرف للإحتراق الكامل. لا يوجد وقود غاز بعد هذه النقطة واستمرار خلط الهواء ونواتج الإحتراق. اللهب العادى له شكل من نوع الزائد التهويه (Over Ventilated). عندما يكون الوقود زائداً، فإن طول اللهب يقابله وصول غاز الوقود عند جدار الأنبوب الخارجى. اللهب يكون فى شكل الجرس Bell Shape)) .

الإنتشار الرقائقى للهب يتحول إلى النوع المضطرب بزيادة سرعة الغاز إلى ما بعد القيمة الحرجة لعدد رينولد (عدد رينولد يتغير ما بين 3500 إلى 10000) طبقاً لمكونات الوقود وكمية الهواء الأولى. ولكن طول اللهب المنتشر المضطرب يتناسب مباشرة مع قطر البزبوز (الفونيه – Nozzle) ولا يتوقف على سرعة الغاز.

طول اللهب هو قياس لمعكوس كثافة الإحتراق (ولذلك لانطلاق الحرارة) ويفيد فى تصميم غرفة الإحتراق.

ثبات اللهب: (Flame Stability)

اللهب حر الإحتراق يقال أنه مستقر فى حالة عدم وجود ومض خلفى (Flash Back) أو تصريف (Blow Off) أى السرعة الطبيعية لإنتشار اللهب للخليط (Vn) تكون مساويه فى الإتجاه (Vector ally) ومعاكسه لسرعة خليط الوقود–الهواء عند مقدمة اللهب (Vav).

السرعة العادية لإنتشار اللهب ، (V_n) تتوقف على :

- طبيعة الوقود.
- مكونات ودرجة حرارة خليط الوقود – الهواء.
- قطر أنبوب الموقد.

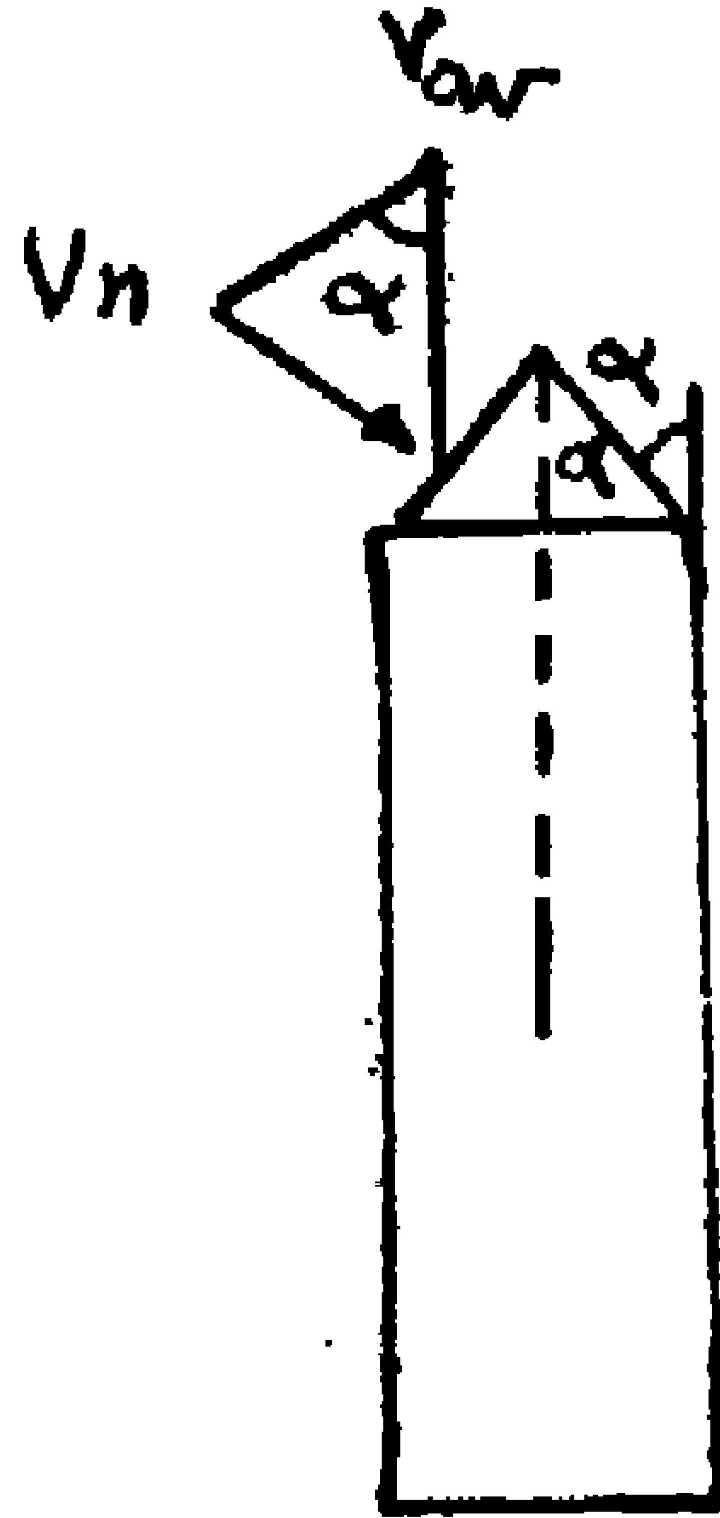
درجة حرارة خليط الوقود–الهواء عند طرف الموقد تتوقف على الإنتقال الحرارى من منطقة

التفاعل. الفقد الحرارى فى المجال المحيط، وحجم وشكل مادة الصنع لجدار الموقد.

متوسط سرعة الغاز (V_{av}) تتوقف على شكل (11).

- معدل التدفق المطلوب.
- قطر بزبوز (فنيه) الموقد.

كذلك (V_{av}) تتغير طبقاً لمساحة مقطع الفنيه.



شكل(11): القمع الداخلى للهب

إذا كان :

$V_{av}\sin\alpha = V_n$ عندئذ يكون اللهب مستقر.

$V_{av}\sin\alpha < V_n$ عندئذ يكون اللهب له وميض خلفى (Flash - Back)

$V_{av}\sin\alpha > V_n$ عندئذ يرتفع اللهب بعيداً عن طرف الوقود.

حيث α = نصف زاوية القمع (بالدرجات) للهب ويتم تعيينها من زاوية توقيع الشكل الجانبي للهب على شاسه وتصويره أو رؤيته خلال المجهر.

الزاوية ما بين المماس لسطح القمع الداخلى ومحور أنبوب الموقد تعطى (α). قيمة (α) تتوقف على مكان مقدمة اللهب. عندما تكون (α)> 90°، فإن اللهب سوف يندفع نحو داخل أنبوب الموقد وسوف يحدث ومض خلفى. إذا كانت (α) ← زاوية صفر فإن مقدمة اللهب يتم تطويرها عند مسافة كبيرة بعد طرف الموقد، عندئذ سوف يكون هناك تخفيف غير ملائم لخليط الحرق من خلال الإنتشار الداخلى مع الجو المحيط حيث يسبب ذلك خفض فى سرعة اللهب

والذى يؤدى إلى إنطفاء اللهب (Blow Off). لذلك، فإن أدنى سرعة للغاز تقابل السرعة العادية لإنتشار اللهب.

زيادة قطر الأنبوب يزيد من حدوث الومض الخلفى بينما إنخفاض قطر الأنبوب يعمل على إحداث التصريف (الإنطفاء) . إستخدام مواد من السيراميك ذات التوصيل الحرارى المتدنى فى عمل طرف الموقد يمنع حدوث إستعداد اللهب المضطرب للإنصراف، ولكن فى نفس الوقت يعزز إستعداد اللهب الرقائقي إلى الومض الخلفى (Flash Back).

اللهب المستقر عند سرعات عاليه للغاز يمكن الحصول عليه بإمساك حلقة سلك عند مسافة كبيرة من طرف الموقد وذلك من خلال الإيلاج الجزئي للسلك فى أنبوب الموقد. سرعة الغاز يتم إبطاءها قريباً من السلك فى كلا الحالتين. يتم الحصول على لهب قمعى على جناح السلك حيث الجزء العلوى للسلك المستقيم يحمل لهب فى شكل مروحة.

درجة حرارة الإحتراق للوقود (Ignition Temperature Of The Fuel)

درجة حرارة الإحتراق للوقود هى أدنى درجة حرارة يحدث عندها الإحتراق للوقود (فى حالة وفرة الأكسجين / الهواء) وحيث أعلا منها وبمجرد بداية الإحتراق فإنه سوف يستمر ذاتياً وأدنى منها لا يمكن حدوث حرق نشط. درجة حرارة الإحتراق تتوقف علي الخاصية المصاحبه للنظام وكذلك على العوامل الدخيله، العارضة. فى حالة ثبات العوامل العارضة عندئذ يتم الحصول على درجة حرارة الحرق كخاصية مميزة لمواد الإحتراق. وهى تتوقف على عوامل مثل نسبة الوقود/المؤكسدات ، طبيعة المؤكسدات، فترة الحث (Induction Period) جدار وعاء الحرق، وجود محفزات ... إلخ. درجة حرارة الإحتراق للمواد تتوقف على طريقة تعيينها.

عادة تستخدم ثلاث طرق لتعيين درجة حرارة الإحتراق التلقائى للأبخرة والغازات.

- دخول خليط مفرقع من الهواء – بخار/غاز إلى وعاء مفرغ ساخن .
- تسخين الوقود (غاز / بخار) أو مؤكسد منفصلاً ثم الخلط فى وعاء ساخن.
- الضغط بدون تبادل حرارى (Adiabatic) للنظام السابق خلطه حتى حدوث الإحتراق.

عادة الطريقة الاولى تستخدم للغازات / الأبخرة.

درجة حرارة الإحتراق للوقود الصلب مثل الفحم ، الكوك يتم تعيينها بطرق مختلفة، فمثلاً فى حالة الفحم، يتم نشر 5 كجرام من مسحوق الفحم فى قاع بوتقه ساخنه. فى حالة الكوك تستخدم طريقة أبطأ التى فيها يتم تسخين عينه الكوك بمعدل ثابت. درجة الحرارة التى عندها

إرتفاع درجة حرارة كتلة الكوك وإسراعها فجأة يتم تسجيله كدرجة حرارة إشتعاله.

درجة حرارة إحتراق الوقود السائل يتم تحديدها بنقاط الزيت في بوتقه ساخنه وملاحظة أدنى درجة حرارة التى عندها يحدث وهج والذى يليه لهب أو انفجار.

تقدير درجة حرارة الإشتعال التلقائي للغاز أو البخار يتم على أساس الآليه الحرارية للإحتراق . العلاقة بين الضغط ودرجة الحرارة الأولية للوعاء يتم تقديرها بمعادلة (Seme Nov's) كالآتى:

$$(A) \qquad Log_e = \frac{P_{cr}}{T_0^2} = \frac{E}{2RT_0} + Constant$$

هذه المعادلة تنطبق للإنفجار الحرارى الناجح للخليط القابل للإحتراق .

حيث:

P_{cr} = الضغط الحرج.

T_0 = درجة الحرارة المطلقة لجدار الوعاء

E = طاقة التنشيط للمحروقات.

R = ثابت الغاز

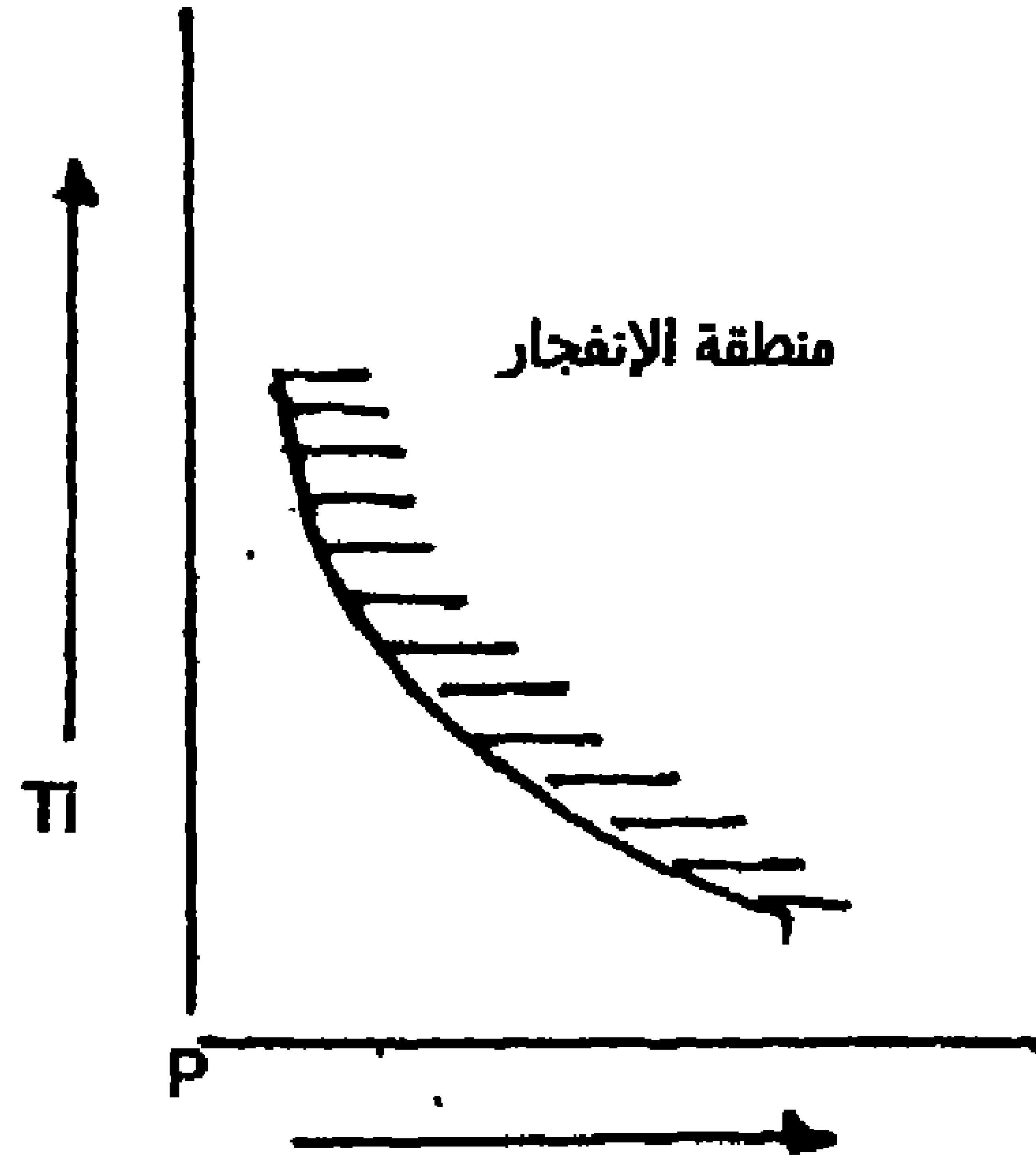
على فرض ($T_0 = T_1$ درجة حرارة الإحتراق)، فإننا نجد أن الضغط الثابت :

$$(B) \qquad Log_e Q = \frac{E}{RT_i} + Constant$$

حيث:

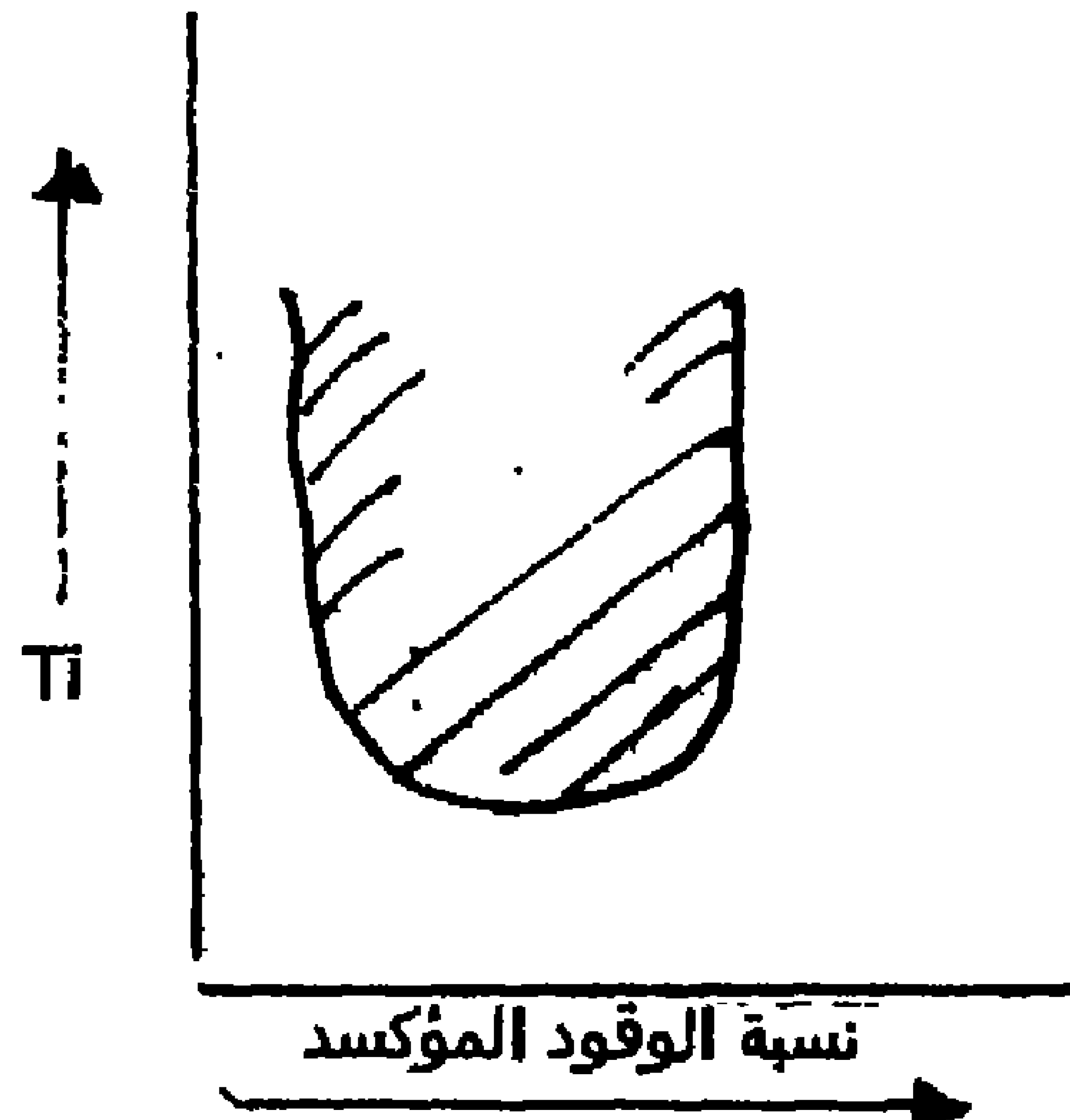
Q = الحرارة المنطلقة بالإحتراق.

إذا كان نظام نسبة الوقود / المؤكسد تتراوح ما بين صفر ، واحد ، فإن (Q) سوف تتغير مع أقصى تكون قريباً من المكافئ. درجة حرارة الإحتراق مقابل (T_i) مقابل الضغط (P) يتم توقيعها فى الشكل (12).



شكل (12): درجة حرارة الإشتعال مقابل الضغط
(للغازات / الأبخرة)

من المعادلة (B) يمكن الحصول على الإسقاط المبين في الشكل (13) ما بين نسبة الوقود / المؤكسد ودرجة حرارة الإحتراق (T_1) والتى تبين وجود اثنين من المكونات الحديه لخليط الوقود / المؤكسد للنظام للحرق وللإنفجار.



شكل (13) مكونات خليط الغاز- الهواء
مقابل درجة حرارة الإشتعال

درجة حرارة الإحتراق للغاز تتغير مع تركيزه وتقل مع الضغط. فى حالة إحتراق الغاز فى أكسجين نقى بدلاً من الهواء عندئذ وفى بعض الحالات يكون هناك خفض قليل فى درجة حرارة الإحتراق.

درجة حرارة اللهب النظرية للوقود:

Theoretical Flame Temperature Of fuels.

درجة حرارة اللهب النظرية للوقود هى درجة الحرارة التى يتم الحصول عليها نتيجة إحتراق الغاز وذلك عند حرقه مع الكمية النظرية للهواء مع عدم السماح بالفقد الحرارى فى المجال المحيط.

تتوقف درجة حرارة اللهب للوقود على الآتى:

- القيمة الحرارية للغاز.
- الحجم والحرارة النوعية لكل المنتجات الغازية.
- الفقد بالإشعاع.
- الحرارة الكامنه فى البخار فى نواتج الإحتراق.
- التحلل الماص للحرارة للجزيئات الغازية (أساساً O_2، H_2O) الموجودين فى توانج الإحتراق.

المعروف هو أربعة أنواع مختلفة من درجة حرارة اللهب وهم:

درجة حرارة اللهب النظرية، درجة حرارة اللهب بدون الفقد الحرارى (Adiabatic) درجة حرارة اللهب الحقيقية، درجة حرارة اللهب بدون الفقد الحرارى أو ببساطة أقصى درجة حرارة.

عند وصول غازات الوقود إلى الإحتراق الكامل وإستخدام حرارة الإحتراق فى تسخين المنتجات، فإن درجة الحرارة الناتجة هى درجة الحرارة النظرية للهب. فى الواقع العملى، الإحتراق لن يكون تاماً عند درجة الحرارة العالية بسبب تفاعلات التحلل. عند الأخذ فى الإعتبار التأثير الماص للحرارة (Endothermic) لتفاعل التحلل يتم الحصول على درجة حرارة اللهب بدون فقد حرارى والتى هى أقل من درجة حرارة اللهب النظرية.

حالات عدم الفقد الحرارى لا توجد فى طريقة الإحتراق العملية نظراً لأنه يوجد دائماً بعض من الفقد الحرارى فى المجال المحيط. ناتج متوسط درجة الحرارة الناتجة للمنتجات يسمى درجة حرارة اللهب الحقيقي والتى هى أقل من كل من درجة حرارة اللهب النظرية ودرجة حرارة اللهب بدون الفقد الحرارى.

كل الثلاث درجات حرارة اللهب التى تم تعريفها تتوقف على مكونات خليط الوقود المؤكسد. زيادة أو كفاءة هواء الإحتراق يقلل من درجة حرارة اللهب. درجة حرارة اللهب النظرية

لها أقصى حجم في حالة المكون المكافئ للوقود والمؤكسد. نظراً لأن درجة حرارة التحلل المادة بالحرارة تزداد مع درجة الحرارة ، فإن الفقد الحرارى يزداد كذلك مع الإرتفاع فى درجة الحرارة بمعدل متسارع. لذلك، فإن أقصى درجة حرارة للهب بدون الفقد الحرارة يتم تحقيقها عندما يكون الوقود أزيد قليلاً من المكون المكافئ.

غازات الوقود ذات المحتوى العالى من المواد الخاملة لها درجات حرارة لهب منخفضة. درجة حرارة اللهب للوقود تكون أعلا فى الأكسجين مقارنة بالهواء بسبب وجود النيتروجين فى الهواء الذى يستهلك كمية كبيرة من الطاقة الحرارية.

أقصى درجة حرارة لهب بدون الفقد الحرارى لبعض أنواع الوقود فى الهواء وفى الأكسجين للقليل من الأنواع طبقاً للجدول التالى:

جدول ( ) أقصى درجة حرارة لهب بدون الفقد الحرارى.

الغاز	فى الهواء		فى الأكسجين	
	نسبة الغاز فى خليط الغاز الهواء بما يعطى أقصى درجة حرارة لهب بدون الفقد الحرارى	أقصى درجة حرارة لهب بدون الفقد الحرارى° م	نسبة الغاز فى خليط الأكسجين لإعطاء أقصى حرارة لهب بدون الفقد الحرارى	أقصى درجة حرارة لهب بدون الفقد الحرارى° م
هيدروجين	31.6	2045	78	-266
CO	32	2100	70	2925
الميثان	10.00	1875	-	-
الإيثان	5.8	1895	-	-
Propane	4.15	1925	-	-
Butane	3.2	1895	-	-
الأيزوبيوتين	3.2	1900	-	-
الأسنيتيلين	7.00	1975	-	-
Propane	4.5	1935	-	-
Butane	3.4	1930	-	-
Acetylene	9.00	2325	44	3137
غاز طبيعي	9.00	1930	-	-
غاز الفحم	17.6	1918	-	-
غاز الماء المكربن	18.8	1930	-	-

غاز الإنتاج	46.7	1663	–	–
غاز الفرن العالى	–	1460	–	–

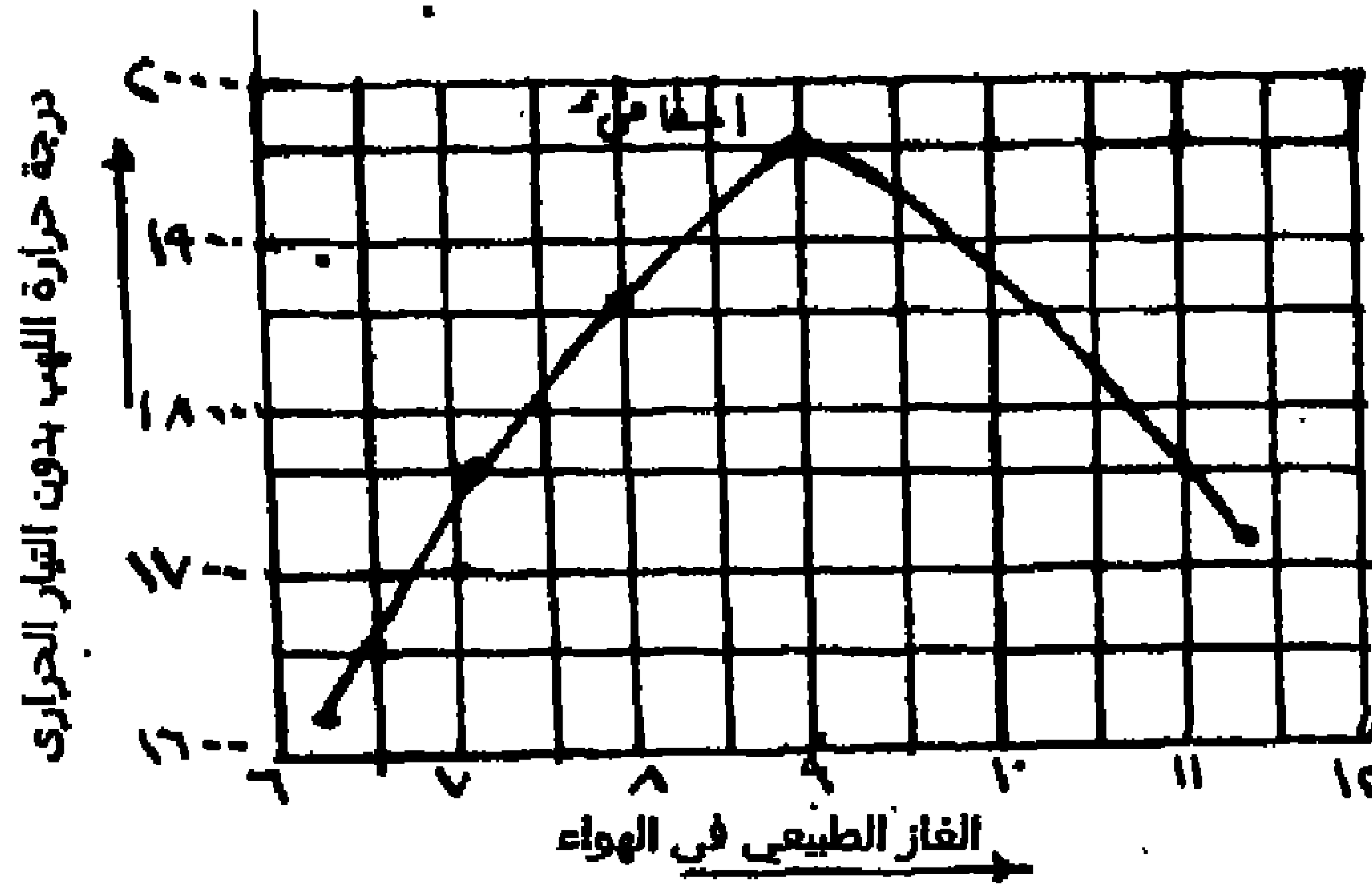
من البيانات السابقة يستدل أنه باستثناء الأسينيلين والهيدروجين وأول أكسيد الكربون فإن كل الغازات المبينه من واحد إلى 14 لها أقصى درجات حرارة لهب حول 1900–1950°م. هذا لأن الزيادة فى القيمة الحرارية للوقود يتم توازنها بمتطلبات الهواء الإضافى وبالتالى كمية أكبر من الغازات العادمة. إنخفاض درجات حرارة لهب غاز الفرن العالى وغاز الإنتاج يرجع إلى محتواها العالى جداً من النيتروجين الخامل.

درجة حرارة الإشتعال للوقود تكون أعلا فى الأكسجين مقارنة فى الهواء من الملاحظ أن تأثير الإنخفاض فى التحلل على درجة حرارة اللهب يكون أزيد بعدة مرات فى إحتراق الأكسجين مقارنة بالإحتراق فى الهواء. كمثال، لهب الميثان– الأكسجين (بنسب تكافؤ 1 : 2) لها درجة حرارة لهب بدون الفقد الحرارى 2740م مقابل درجة حرارة اللهب النظرية له عند 5050°م. الهبوط فى درجة حرارة اللهب. الذى يرجع إلى التحلل الماص للحرارة يكون مرتفعاً حتى 2310°م. القيم المقابلة للمكون المكافئ فى الهواء هى:

- درجة الحرارة النظرية للهب 2060°م.
- درجة حرارة اللهب بدون فقد حرارى 1870°م.

وبالتالى فإن الهبوط الذى يرجع إلى التحلل الماص للحرارة هو 190°م فقط (أى حوال 12/1 من الهبوط فى الأكسجين). إذا كانت نواتج الإحتراق فى النظام من الصعب تحللها عند درجة الحرارة العالية عندئذ فإن درجة حرارة اللهب بدون الفقد الحرارى الناتجة ستكون مرتفعة جداً. فمثلاً لهب (Cyanogens Oxygen) له المنتجات(N_2, CO)ويعطى درجة حرارة عند4580°م. بالمثل، لهب فلوريد الهيدروجين له أقصى درجة حرارة إشتعال بدون الفقد الحرارى عند4300°م

يمكن زيادة درجة حرارة الإشتعال بدرجة كبيرة من خلال التسخين المسبق للهواء أو وقود الإحتراق. التغير فى درجة حرارة اللهب بدون الفقد الحرارى مع مكونات خليط الوقود– اللهب للغاز الطبيعي موضح فى الشكل (14).



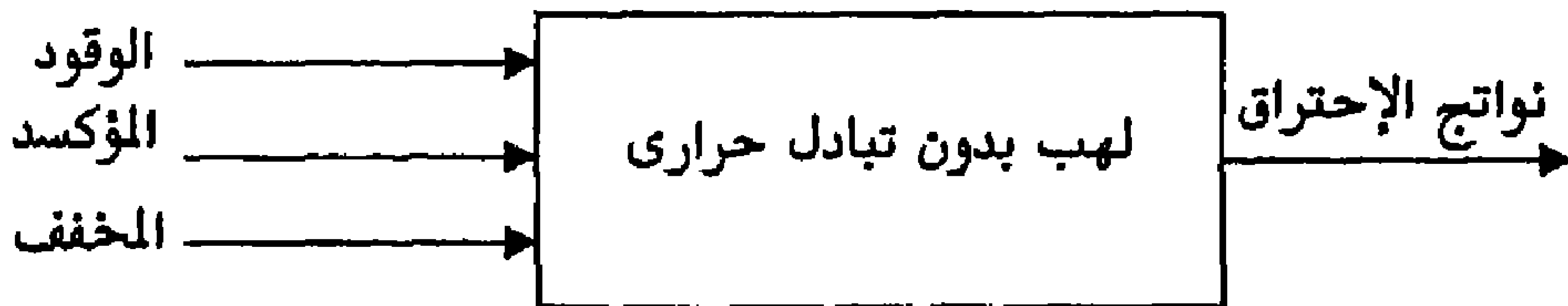
شكل (14): المكونات مقابل درجة حرارة اللهب بدون التيار الحرارى

درجة حرارة اللهب بدون الفقد الحرارى هى أقصى درجة حرارة التى من الممكن الحصول عليها طبقاً لمجموعة حالات الوقود، المؤكسد، المخفف ودرجة الحرارة لنظام التسخين المكافئ، فإن درجة حرارة اللهب يجب أن تكون أعلا من درجة الحرارة المطلوبة للعملية. باستخدام وقود ذو قيمة حرارية عاليه وباستخدام الأكسجين بدلاً من الهواء، باستخدام نسب تكافؤية والتسخين السبق لمكونات التفاعل تكون هى الطرق العملية لزيادة درجة حرارة الإشتعال. زيادة درجة حرارة الإشتعال، تزيد من كفاءة الإنتقال الحرارى من اللهب إلي سطح التسخين.

الحساب من درجة حرارة اللهب: (Calculation From Flame Temp)

درجة حرارة اللهب عند حسابها بعمل ميزان حرارى بين الوقود والهواء على جانب ونواتج الإحتراق على الجانب الآخر. يتم عمل الفرضيات الآتية بالنسبة للهب بدون الفقد الحرارى.

- لا يوجد فقد فى الحرارة نحو المجال المحيط.
- الإحتراق يكون كاملاً.
- عدم حدوث تحلل حرارى.
- استخدام درجة حرارة معطاه (إسناد– Datum) عادة°م.



شكل (15) الميزان الحرارى

عندئذ فإن الميزان الحرارى للهب يعطى:

درجة حرارة اللهب = (درجة الحرارة المعطاه + القيمة الحرارية الصافيه + التسخين) / (الحجم × متوسط الحرارات النوعية)

نظراً لأن الحرارة النوعية لنواتج الإحتراق هى بدلالة درجة حرارة اللهب الغير معروفة فإن الحساب يتم بالمحاولة والخطأ، مع تصحيح كل دورة لحرارة نوعية مناسبة. بعد حوالى 2000°م يظهر خطأ كبير بسبب التحلل الحرارى الذى يمتص الحرارة ويخفض من درجة حرارة اللهب الحقيقية المنتجة.

من المناسب بناء الحسابات على واحد كيلو جرام من الوقود الصلب / السائل أو (Nm^3) من الوقود الغازى. كل كميات المؤكسد ومنتجات المخلفات تكون عندئذ ذات علاقة بالوحدة الكمية للوقود يتم عندئذ حسابها فى وحدات كيلو كالورى. الميزان الحرارى فى حالة درجة حرارة اللهب الحقيقية فى الهواء يعطى الآتى:

$$(X) \qquad C_N + \Delta H_F + A.\Delta H_{Fg} + = V.\Delta H_{Fg} + q_d + q_i$$

حيث:

C_N = القيمة الحرارية الصافية للوقود كيلو كالورى / Nm^3 وقود.

ΔH_F = المحتوى الحرارى للوقود (Enthalpy) للوقود أعلا من درجة حرارة الإسناد — المعطاه كيلو كالورى / Nm^3 للوقود.

A = الإمداد بالهواء Nm^3/Nm^3 وقود.

ΔH_n = المحتوى الحرارى للهواء أعلا من درجة حرارة الإسناد كيلو كالورى / Nm^3 للغاز العادم.

q_d= الفقد الحرارى بالتحلل الماص للحرارة كيلو كالورى / Nm^3 للوقود.

Q_i= الفقد الحرارى لمجال المحيط كيلو كالورى / Nm^3 للوقود.

الآن:

$$(Y) \qquad \Delta H_{Fg} = t_F \times C_{(PF_g - t_p)} - tr \times C_{PF_g (0-t_p)}$$

حيث :

t_r = درجة حرارة الأساس (25°م مثلاً)°م.

t_f = درجة حرارة اللهب °م.

$C_{PF_{g}(0-t_f)}$= متوسط الحرارة النوعية للغاز العادم ما بين صفر ودرجة مئوية (t_f).

$C_{PF_{g}(0-t_r)}$= متوسط الحرارة النوعية للغاز العادم ما بين صفر °م ، (t_r).

في حالة فرضية أنه لا يوجد تحلل حراري، عندئذ (q_d)= صفر.

في حالة درجة حرارة اللهب بدون فقد حراري (q_{Loss}) = صفر .

في حالة إمداد الوقود والهواء عند درجة حرارة إسناد مرجعية عندئذ (ΔH_F) و (ΔH_s) كلاهما يساوى صفر.

في حالة درجة حرارة اللهب النظرية q_d= صفر ، q_1 = صفر من المعادلة X، y فإننا نحصل على المعادلة العامة لحساب درجة حرارة اللهب وهي:

$$t_f = \frac{C_N + \Delta H_F + A \times \Delta H_a - q_d - q_1 + V \times t_r \times C_{PF_g}(0.t)_r}{V.C_{PF_g(0-t_F)}}$$

ظهور واستخدام (t_F) على كلا جانبي المعادلة السابقة (Z) يعقد الحساب لـ(t_F) نظراً لأن الحرارة النوعية للغاز العادم تعتمد على غير معلوم (t_f)، لذلك تستخدم طريقة المحاولة والخطأ.

مثال:

تاثير تغير الظروف على درجة حرارة اللهب.

احسب درجة حرارة اللهب النظرية لغاز الفرن العالى فى الظروف التالية :

أ. كلا من الهواء النظرى وغاز الفرن العالى عند 15°م.

ب. 50 ٪ زيادة فى الهواء عند 15°م وغاز عند 15°م.

ج. الهواء النظرى عند 60°م والغاز عند 400°م.

البيانات: (أ)

مكونات غاز الفرن العالى (بالحجم)هو:

CO = 22 % ، CO_2 = 18 % ، H_2= 2 %، N_2 = 58 %

القيمة الحرارية الصافية لغاز الفرن العالي= 719 كيلو كالورى/ Nm^3 متوسط الحرارة النوعية لغاز الفرن العالى عند 600°م

= 0.342 كيلو كالورى / متر مكعب °م.

درجة حرارة°م	متوسط الحرارة النوعية	
	الهواء	نواتج الحرق النظرية (الغاز العادم)
600	0.324	–
1000	0.337	0.389
1200	0.343	0.397
1400	0.347	0.404
1600	0.349	0.409
1800	0.355	0.415
2000	0.350	0.419

على فرض أن درجة حرارة الإسناد (الأساس) t لتكون صفر°م وأنه لا يوجد تفاعل تحلل ماص للحرارة لنواتج الإحتراق .

الحل:

أولاً: يتم إيجاد الحجم النظرى للأكسجين، الهواء والغازات العادمة عند حرق غاز الفرن العالى. هذه يتم الحاجة إليها فى حسابات درجة حرارة اللهب.

الأساس : 100 متر مكعب من غاز الفرن العالى:

مكونات غاز الفرن العالى	الحجم ٪	الأكسجين النظرى المطلوب للحرق الكامل (م3)	نواتج الإحتراق		
			Co2	H2O	N2
Co	22	11	22	–	–
CO_2	18	–	18	–	–
H_2	2	1	–	2	–
N_2	58	–	–	–	58
N2 من الهواء	–	–	–	–	45.1
الاجمالى	100	12	40	2	103.1

الأكسجين النظرى المطلوب = 12 متر مكعب.

الهواء المطلوب نظرياً = $12 \times \frac{100}{21} = 57.1$ متر مكعب

N_2 الموجود فى الهواء النظرى= $57.1 \times \frac{79}{100} = 45.1$ متر مكعب

والذى سوف يظل كذلك فى الغاز العادم.

إجمالى الغاز العادم عند استخدام الهواء فى الحرق أى $(CO_2+H_2+N_2)$=

= 40 + 2 + 103.1 =145.1متر مكعب.

إجمالى الغاز العادم عند استخدام الأكسجين فى الحرق=

40+2+58= 100 متر مكعب

لذلك فإن الغازات العادمة المنتجه عند إستخدام الأكسجين فى الحرق = $\frac{100}{100}$

= 1 متر مكعب / متر مكعب من غاز الفرن العالى

الهواء النظرى المطلوب = 0.571 متر مكعب / متر مكعب من غاز الفرن العالى.

50 ٪ هواء زائد= 0.5 × 0.571 = 0.2855 متر مكعب/متر مكعب من غاز الفرن العالى

الأكسجين النظرى المطلوب = 0.012 متر مكعب / متر مكعب من غاز الفرن العالى:

الآن:

كتابة المعادلة العامة لدرجة حرارة اللهب نحصل على:

$$t_f=\frac{C_N+\Delta H_F+A\times\Delta H_a-q_d-q_1+V\cdot t\cdot C_{PF_g(0-t_r)}}{V.C_{PF_g(0-t_p)}}$$

هنا: q_1,q_d= صفر فى حالة درجة حر اللهب النظرية.

t_r = درجة الارة الإرشادية = صفر درجة مئوية.

لذلك:

$$\frac{\Delta H_a\times A+\Delta H_F+C_N}{V\cdot C_{PF_g(0-t_F)}}=t_F$$

هنا: C_N = 719 كيلو كالورى / م^3

ΔH_F = الحرارة الكامنة لغاز الفرن العالى عند 15°م

= 15 كيلو كالورى / م^3 من غاز الفرن العالى.

A = الإمداد بالهواء = 0.571 م^3 / م^3.

ΔH_a= الحرارة الكامنة فى الهواء عند 15 °م = 15 كيلو كالورى/م^{3}من غاز الفرن العالى

V= الغاز العادم المنتج = 1.451 م^3/م^3 من غاز الفرن العالى.

التقريب الأولى :

على فرضية أن: $C_{PF_{g}(0-t_F)} = 0.397$ كيلو كالورى/م^{3}م.

وبفرض قيمة 1200C بالنسبة (t_F) :

$$(t_F) = \frac{719+15+0.579\times15}{1.451\times0.397}$$

عندئذ:

$$=1289\ ^{\circ}C$$

نظراً لأن قيمة درجة حرارة اللهب الإفتراضية كانت 1200°م ووضع قيمة الحرارة النوعية للغاز العادم عند 1200°م أى 0.397 فإننا نحصل على درجة حرارة اللهب $t_F = 1289\ ^{\circ}C$، والتى هى تزيد عن القيمة الفرضية والتى هى $1200\ ^{\circ}C$ – لذلك يلزم عمل تقريب ثاني.

التقريب الثاني:

بفرض أن درجة حرارة اللهب هى $1250^{\circ}C$، الآن كمية الحرارة النوعية C_{PF_g} للغاز العادم عند $1250^{\circ}C$ يتم حسابها بالإستكمال الخطى (Linear Interpolation) لـ C_{PF_g}ما بين $1200^{\circ}C, 1400^{\circ}C$ فى عدم وجود بيانات مناسبة.

$$C_{PF_g} at 1200^{\circ}C = 0.397 Kcal/m^{3\circ}C$$

$$C_{PF_g} at 1400^{\circ}C = 0.404 Kcal/m^{3\circ}C$$

$$C_{PF_g} at 1300^{\circ}C = \frac{1200\times0.397+1400\times0.404}{1200+1400}$$

$$= 0.399 Kcal/m^{3\circ}C$$

لذلك

$$t_F = \frac{719+15+0.571\times15}{1.451\times0.399}$$

$$=1282^{\circ}C$$

هنا تم إفتراض قيمة درجة حرارة اللهب أى ($1250^{\circ}C$) والتى هى أقل كثيراً عن درجة حرارة اللهب المحسوبه أى ($1282^{\circ}C$) . لذلك فسوف يتم عمل تقريب ثالث.

التقريب الثالث:

أ. لنفترض أن درجة حرارة اللهب هى ($1275^{\circ}C$)

$$C_{PF_s} at 1275^{\circ}C = \frac{1250 \times 0.399 + 1300 \times 0.4007692}{1250 + 1300}$$

$$= 0.400 Kcal/m^{3\circ}C$$

لذلك :

$$t_F = \frac{719 + 15 + 0.571 \times 15}{1.451 \times 0.400} = 1279^{\circ}C$$

حيث أن القيمة المحسوبة لـ(t_F) هى ($1279^{\circ}C$) والتى تكون قريبة إلى حد ما من القيمة الإفتراضية لدرجة حرارة اللهب (لحساب الحرارة النوعية) أى $1275^{\circ}C$ ، لذلك فإن هذا التقريب يعطى درجة حرارة اللهب الصحيحة والتى هى $1279^{\circ}C$.

ب. حساب درجة حرارة اللهب عند 50٪ هواء زائد عند 15°م وغاز عند 15°م.

كما نعرف أن الهواء الزائد يقلل من درجة حرارة اللهب، لذلك فإننا سوف نسير على فرضية قيمة أقل لدرجة حرارة اللهب مقارنة بالحالة (أ).

الآن:

$$t_F = \frac{C_N + \Delta H_F + A \Delta H_a}{V \cdot C_{PF_s(0-t_F)}}$$

بفرض أن درجة حرارة اللهب هى ($100^{\circ}C$)

فإنه يتم إيجاد (C_{PF_s}) عند ($100^{\circ}C$) بالاستكمال الخطى للحرارة النوعية للغاز العادم ما بين ($1200^{\circ}C$،$1000^{\circ}C$) .

$$C_{PF_s} 1100^{\circ}C = \frac{1000 \times 0.389 + 1200 \times 0.397}{100 + 1200} = 0.393 Kcal/m^{3\circ}C$$

$$C_{PF_s} 1100^{\circ}C = \frac{(1000 \times 0.337 + 1200 \times 0.343)}{1000 + 1200} = 0.340 Kcal/m^{3\circ}C$$

$$t_F = \frac{719 + 15 + 1.5 \times 0.571 \times 15}{1.451 \times 0.393 + 0.2805 \times 0.340} = 1222^{\circ}C$$

(حيث أنه تم استخدام 50 ٪ هواء زائد)

حيث ان القيمة الفرضية لدرجة حرارة اللهب أى $1100^{\circ}C$ هى قريبة إلى حد ما من القيمة المحسوبة $1122^{\circ}C$ لذلك فإن درجة حرارة اللهب فى هذه الحالى هى $1122^{\circ}C$.

ج. درجة حرارة اللهب عندما يكون الهواء النظرى عند 600°م والغاز عند 400°م.

هنا: نظراً لأن كلا من الغاز والهواء تم تسخينهم مسبقاً، لذلك فإنه يتوقع زيادة كبيرة في درجة حرارة اللهب النظرية.

$$t_F = \frac{C_N + \Delta H_F + A\Delta H_a}{V \cdot C_{PF_t}}$$

حيث:

$\Delta H_F = 400 Kcal/m^3$ (الغاز عند 400°م)

$and \quad \Delta H_a = 600 Kcal/m^3$ (الهواء عند 600°م)

بفرض أن درجة حرارة اللهب هى1600 °م التي عندها الحرارة النوعية للغاز العادم تكون $0.409 Kcal/m^{3\circ}C$

لذلك:

$$t_F = \frac{719 + 400 + 0.571 \times 600}{1.451 \times 0.409 + 1 \times 0.349} = 1550^\circ C$$

حيث أن القيمة الفرضية 1600°م قريبة إلى حد ما من القيمة المحسوبة لـ(t_F) أى 1550°م فإن درجة حرارة اللهب النظرية للغاز فىهذه الحالة (عند التسخين المسبق لكل من الغاز والهواء) هي حوالى 1550°م.

د. درجة حرارة اللهب عندما يكون الأكسجين عند 15°م (بدلاً من الهواء) والغاز عند 15°م.

$$t_F = \frac{C_N + \Delta H_F + A \times \Delta H_a}{V \times C_{PF_t}}$$

إستخدام الأكسجين بدلاً من الهواء للإحتراق سيزيد من درجة حرارة اللهب. بفرض أن درجة حرارة اللهب ($1800^\circ C$) فإننا نحصل على:

$$t_F = \frac{719 + 15 + 0.12 \times 1.5}{1 \times 0.415} = 1770^\circ C$$

هذه النتيجة هي قريبة إلى حد ما من القيمة الفرضية. لذلك فإن درجة حرارة اللهب في هذه الحالة ($1770^\circ C$).

سرعة اللهب (Flame Velocity)

سرعة اللهب هى السرعة التى يسير بها اللهب خلال محلول الغاز – الهواء أو السرعة لمقدمة اللهب. عند إشتعال خليط من الغاز والهواء القابل للإحتراق فى أنبوب زجاجى عند أحد النهايات بواسطة شرر، فإن مقدمة اللهب تسير نحو الطرف الآخر لحين إحتراق الخليط. كذلك

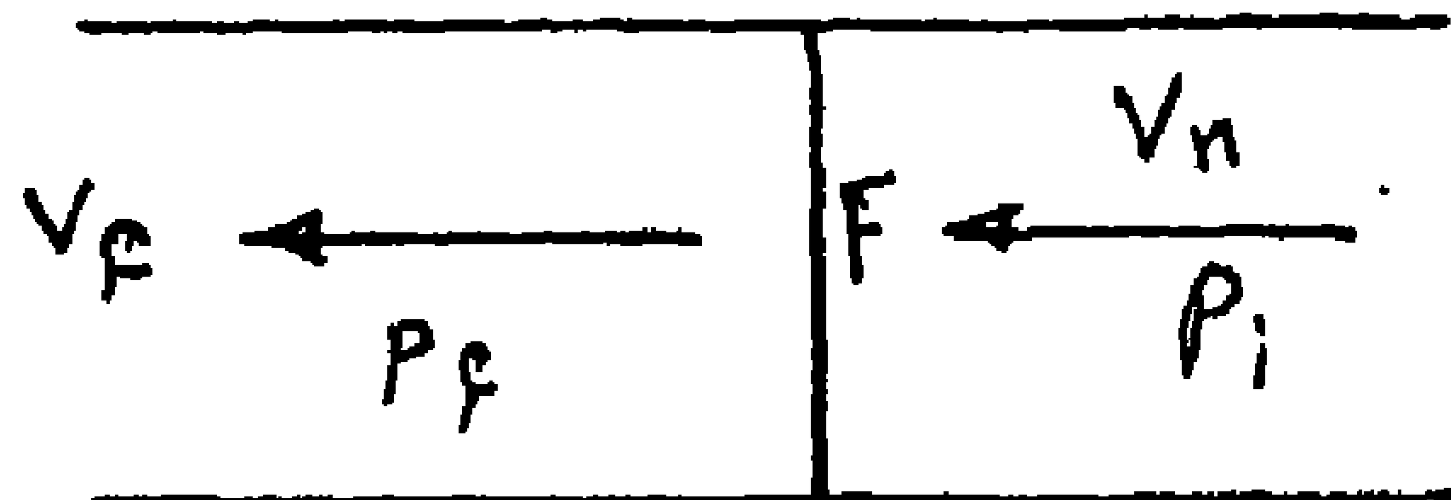
تسمى سرعة إمتداد اللهب. إذا كانت السرعة الطولية لخليط الهواء الغاز المتدفق خلال فتحات الموقد ليست أكبر من سرعة اللهب عندئذ يحدث إرتداد للهب (إشتعال خلفي Back Fire). ولكن إذا كان الخليط الغاز – الهواء سرعته ليست عاليه عندئذ فإن اللهب سوف يترك طرف الموقد.

سرعة اللهب تتوقف على المكونات وتصل إلى الأقصى في حالة الخليط الغني إلى حد ما بالمحتوى من الوقود يزيد عن المكونات التكافؤيه. تزيد سرعة اللهب إذا كانت درجة الحرارة في حالة زيادة درجة حرارة الخليط القابل للإحتراق أو إنخفاض الضغط للنظام. مع زيادة قطر / الأنبوب/الماسورة/الموقد تزداد سرعة اللهب.

سرعة اللهب والتى تسبب إنطلاق الحرارة في الحرق تعتبر مع الحرص لحل كثيراً من المشاكل العملية في الإحتراق. يمكن توضيحه بإنفجار خليط من الغاز – الهواء في أنبوب زجاجي بالإشعال عند أحد النهايات بواسطة شرر (مصدر طاقة خارجي). يمكن رؤية مقدمة اللهب تسير نحو الطرف الآخر حتى تمام حرق كل الخليط.

بالنسبة للهب ليظل ساكناً، فإنه يلزم حالات محيبه مطلوبة. عند إعتبار نظام ذو سطح إحتراق (F) (مقدمة اللهب) عمودية على محور أنبوب أسطوانى الذى فيه خليط الغاز الهواء يتحرك من اليمين إلي اليسار كما هو موضح في الشكل رقم (16). لذلك فإن اللهب يميل للتحرك من اليسار إلى اليمين نحو الغاز الطازج القادم.

إذا كانت سرعة الغاز مساوية لسرعة اللهب، فإن سطح الإحتراق سيظل ثابتاً. إتجاه سرعة اللهب هي عمودية على سطح (F). وهذه تسمى السرعة العمودية لإنتشار اللهب (V_n) للتفرقة مع سرعة الإنتشار العالية للهب في الإنفجار (الذى يكون بعدة كيلو مترات /الثانية).



شكل (16): سكون اللهب في الأنبوب

سرعة الإحتراق (عادة تستخدم بدلاً من سرعة إمتداد اللهب) هي السرعة بالنسبة للغاز الغير محترق الذى تسير به مقدمة مميزه للهب على طول الإتجاه العمودى نحو سطحها. يوجد تدرج حاد في سرعة الغاز، كفاءة الغاز، درجة الحرارة والمكونات خلال مقدمة اللهب.

مقدمة اللهب هى نظام لهب منفجر يتحرك بسرعة التى هى محصلة مجموع السرعة العمودية لإمتداد اللهب وسرعة الغاز. فى حالة منع تدفق كتلة الغاز فى الوعاء، عندئذ فإن المعدل الحقيقي لتقدم مقدمة اللهب نحو الغاز الغير محترق سيكون سرعته عمودية لإمتداد اللهب.

ظاهرة امتداد اللهب يتم شرحها بمجموعة من نظريات آليات التسرب. المنطقة القريبة من اللهب يحدث لها تسخين بالتوصيل الحرارى (Conduction) والحمل الحرارى (Convection) وكذلك يتم تسرب الحاملات السلسلية (Chain Carriers) من اللهب إلى تلك المنطقة. المنطقة ما قبل اللهب نتيجة لذلك تصبح منطقة التفاعل النشط ويتحول إلى اللهب الجديد حيث إكتمال التفاعل وتأثير التبريد النسبي يطفي لمعان المنطقة التى وجد فيها اللهب مسبقاً. التأثير النهائى هو تقدم مقدمة اللهب. السرعة العمودية لإمتداد اللهب ، V_n (المشتقة من إمتداد اللهب بالتوصيل الحرارى فقط) هي:

$$V_n = \sqrt{a.Ke^{-E/RT}}$$

حيث:

a = متوسط التسرب الحرارى.

K = معامل التردد.

E = طاقة النشاط التفاعلية.

R = ثابت الغاز.

T = درجة حرارة اللهب.

سرعة اللهب تتناسب طردياً مع الجذر التربيعي للتسرب الحرارى وتتناسب عكسياً مع الجذر التربيعي لخاصية زمن التفاعل. الحالات التى تزيد من درجة حرارة اللهب سوف ترفع بحدة سرعة اللهب.

لا توجد معادلة دولية مقبولة لحساب سرعة اللهب من الخواص الأساسية للنظام. السطح له تأثير كبير على إمتداد اللهب فى حالة إرتفاع نسبة السطح إلى الحجم. سطح الوعاء يبطئ إمتداد اللهب بإحداث تأثير التبريد وإدمصاص الحاملات السلسلية. كحقيقة واقعة، الإحتراق يمكن إيقافه تماماً فى الأنابيب الضيقة جداً والتى لاحظها (Davis) والتى على أساسها قام بإكتشاف المصباح الآمن الذى حمل إسمه.

التعيين التجريبي لسرعة إمتداد اللهب العمودية:

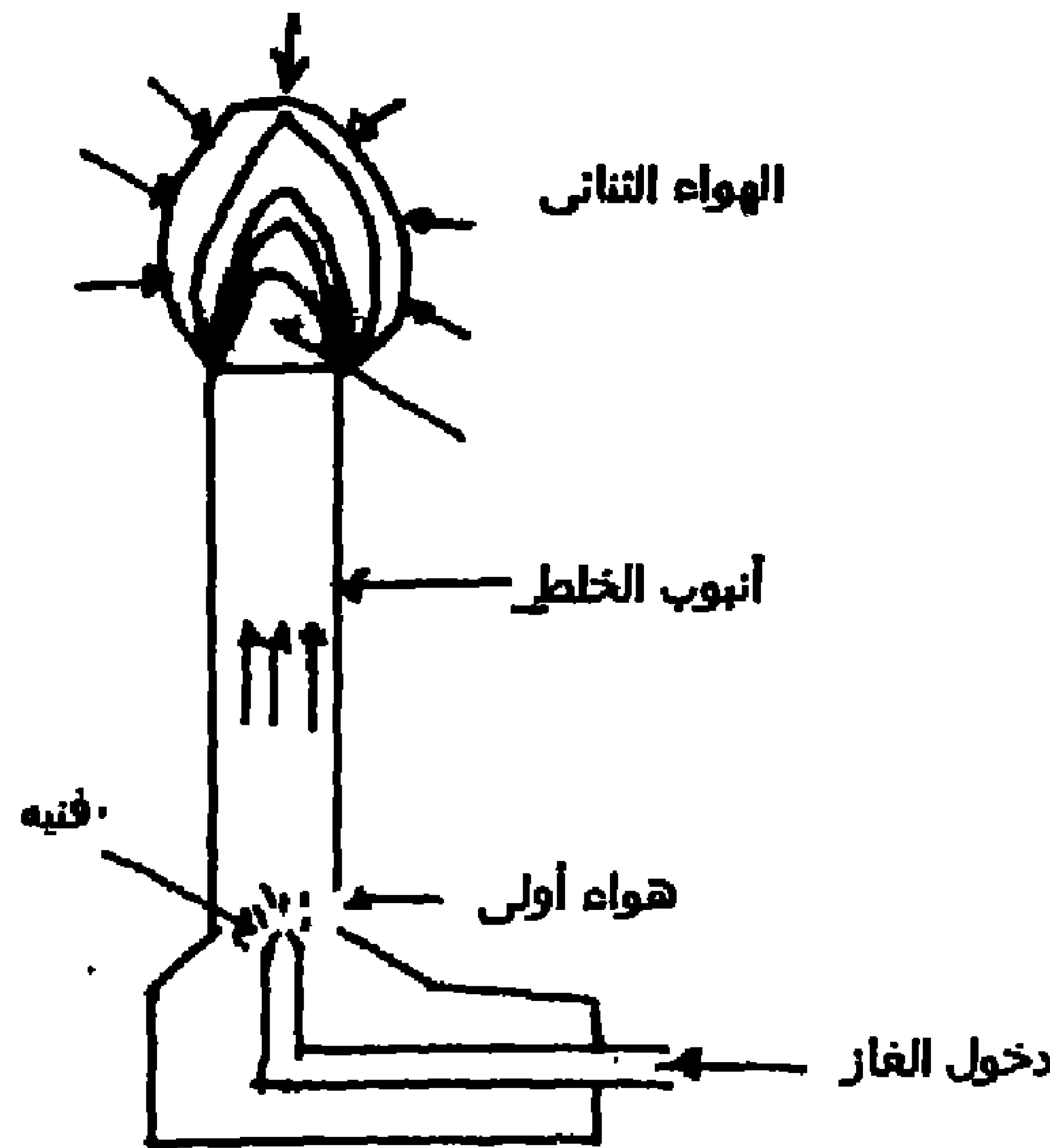
Experimental Determination of Normal Velocity of Flame Propagation:

توجد ثلاث طرق لتعيين سرعة إمتداد اللهب وهي:

- موقد بنزن (Bunsen Burner) أو طريقة اللهب الثابت.
- طرق الفتيلة الكروية.
- طريقة أنبوب الزجاج.

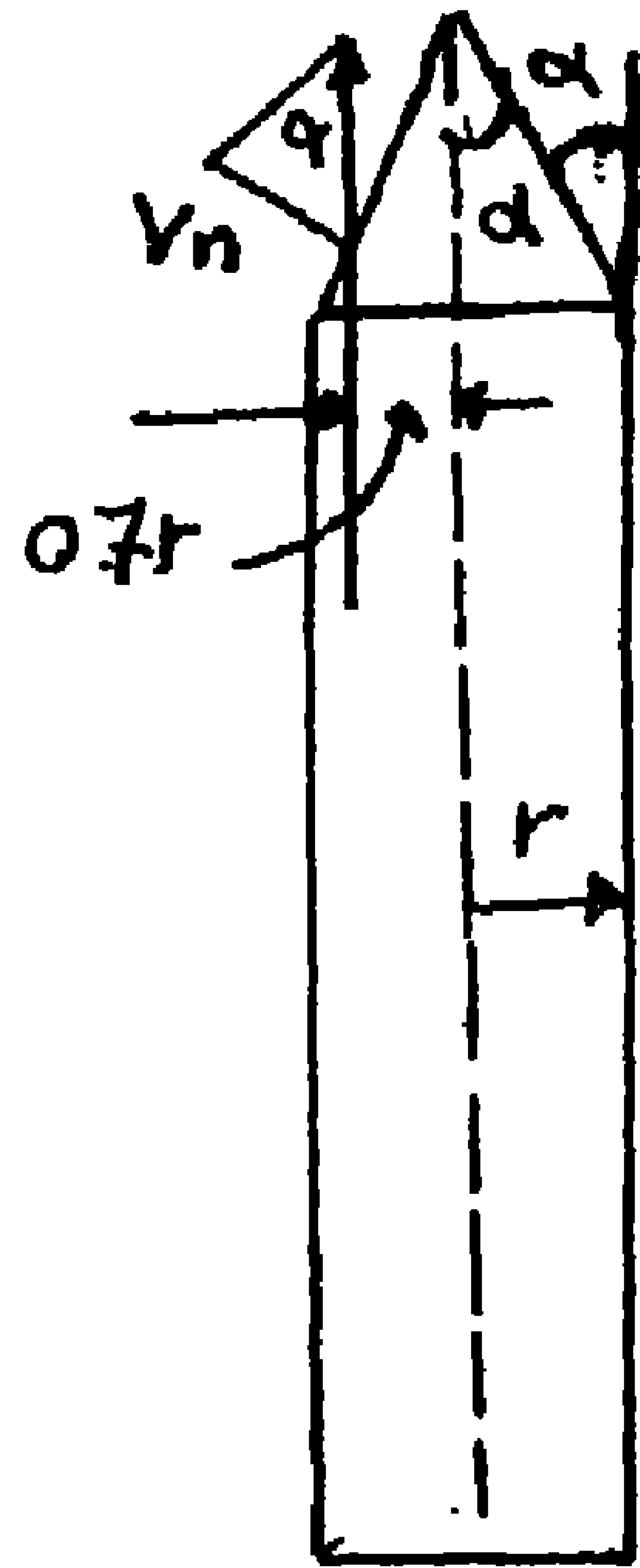
كل هذه الطرق مع الحرص المناسب والتصميمات الضرورية تعطى نتائج مقارنة ومتطابقة لسرعة اللهب.

فى حالة طريقة موقد بنزن الشكل رقم (17)، فإنه يتم خلط وقود الغاز والهواء الأولى (50-60 ٪ من الهواء الكلي) فى أنبوبة الخلط وحرق الخليط بلهب ثابت مثبت عند طرف الموقد.



شكل (17): مكونات موق بنزن

اللهب له قمع داخلى وغلاف خارجى. يتقدم الإحتراق عند القمع الداخلى حتى استهلاك أكسجين الهواء الأولى. الغلاف الخارجى هو منطقة الإحتراق الثانى حيث المحروقات المتبقية تحترق فى الهواء الثنائى المستخدم من الجو. يتقدم اللهب فى إتجاه عمودى على سطح القمع الداخلى. نظراً لأن اللهب ثابت، فإن السرعة العمودية لتقدم اللهب (V_n) هى تساوى متجها (Vector ally Equal) ومعاكساً لسرعة خليط الغاز الخارج من طرف الموقد والذى يمكن حسابه من المعلومات عند سرعة الغاز وزاوية القمع باستخدام مثلث الإتجاه (Vector Angle) الموضح فى الشكل (18).



شكل (18): طريقة قياس السرعة العادية
لإنتشار اللهب (Vn)

سرعة الغاز تختلف على طول مساحة المقطع للانبوب حتى تكون عند الأقصى عند محور الأنبوب وصفر عند الجدار. السرعة المحلية عند مسافة 0.7 نصف القطر من المحور تمثل السرعة المتوسطة. السرعة العادية (العمودية) لإمتداد اللهب (V_n) تكون طبقاً للمعادلة

$$V_n = V_{av} \sin\alpha$$

حيث :

V_{av}= متوسط السرعة لخليط الغاز — الهواء = $\frac{V}{A}$.

هنا V = مساحة مقطع الأنبوب.

A = معدل تدفق الخليط.

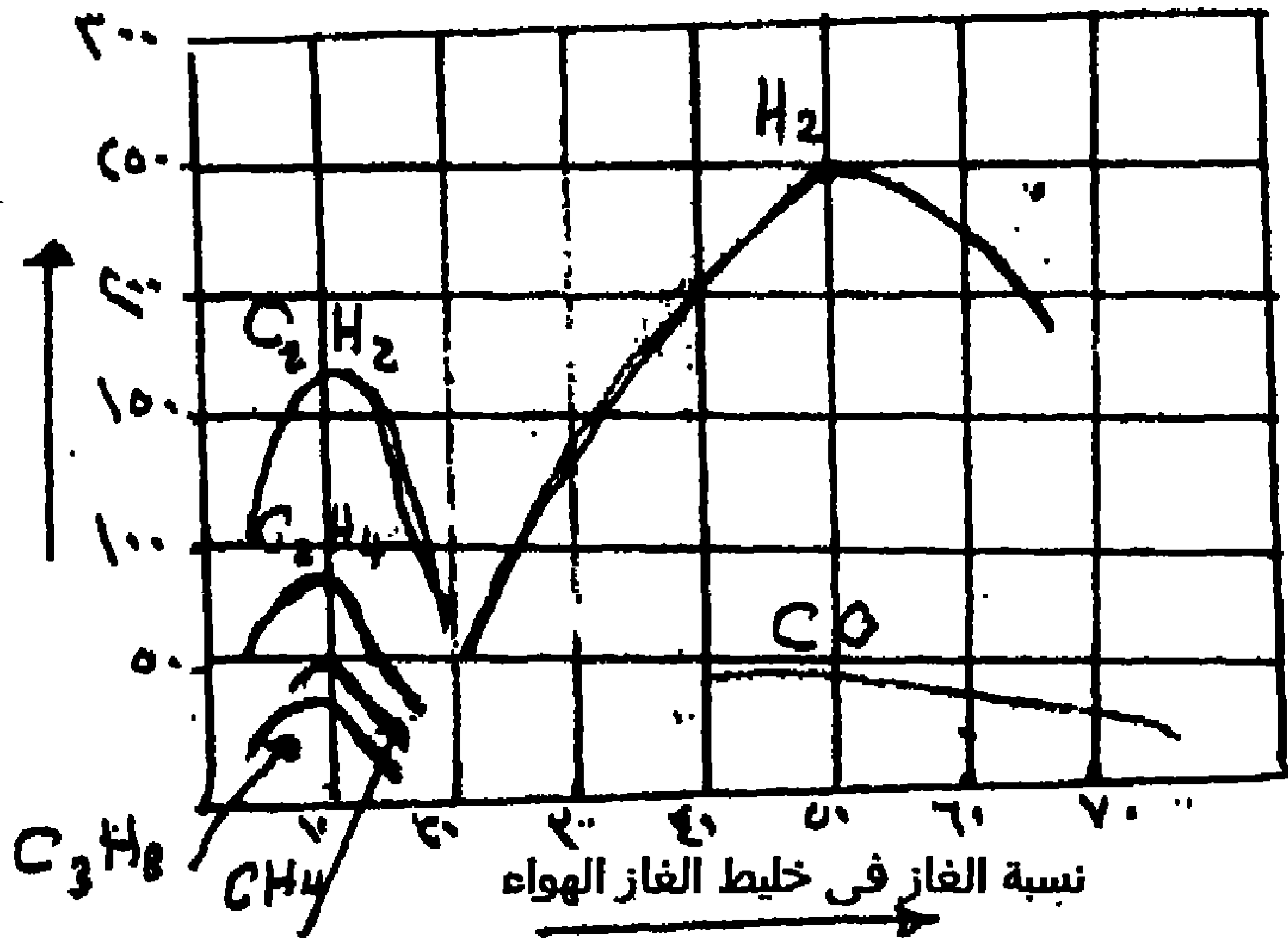
2α= زاوية القمع بالدرجات.

الزاوية α يتم تحديدها من زاوية اللهب التى توقع (Projected) على شاسه، يتم تصويرها أو بالرؤية المباشرة باستخدام التليسكوب. الزاوية بين مماس السطح الداخلى للقمع ومحور الأنبوب تعطي قيمة (α).

تتأثر (V_n) بالضغط، درجة الحرارة ، خليط الوقود– المؤكسد، السطح.. إلخ.

تتغير سرعة اللهب من وقود إلى آخر طبقاً لآليات تفاعلات الإحتراق، لنوع معين من

الوقود، تتغير سرعة اللهب طبقاً للمكونات وتصل إلى الأقصى فى حالة الخليط الغنى بالوقود إلى حد ما فى محتواه بما يزيد عن المكونات التكافؤية (Stiochiometric Composition). هذه العلاقة تشبه علاقة اللهب– درجة الحرارة المكونات. تغير سرعة اللهب طبقاً للمكونات (لمختلف الغازات) موضح فى الشكل رقم (19).



شكل (19): المكونات مقابل سرعة اللهب

لهب الهيدروجين هو الأسرع (V_n = 250 سم /ث) يليه الإستيلين (V_n = 150سم /ث). أول أكسيد الكربون ، البارافينات (Parrafins)، البنزين... إلخ لهم (V_n) فى المجال من 30 – 40 سم/الثانية. البروبين (Propane) أعلا قليلاً من ذلك بينما الإيثلين (Ethylene) يزيد عن 60 سم / ث. كل تلك القيم لـ(V_n) والتى هى لنظام الوقود الهواء ترتفع إلى 5–10 أضعاف تلك القيم فى حالة إستبدال الأكسجين بديلاً عن الهواء.

مع زيادة درجة حرارة الإحتراق الأولية للخليط (T)، فإن سرعة اللهب ترتفع (تبعاً لـ $T^2 \alpha$ V_n) بينما إنخفاض الضغط (P) للنظام يرفع كذلك سرعة اللهب (تبعاً $V_n \alpha P^{1/4}$). كمثال ، بالتسخين المسبق لخليط H_2 – هواء إلى 430°م، CH_4 هواء إلى 680°م فإن أقصى قيمة لـ V_n يمكن زيادتها من 2.5 إلى 13.5 متر / ثانية ومن 0.3 إلى 3 متر / الثانية على التوالى.

لأى خليط من الغازات، يتم حساب سرعة اللهب بالمعادلة التالية :

$$S = \frac{aS_a + bS_b + cS_c + ...}{a + b + c + ...}$$

حيث :

a,b,c = نسبة ٪ مكونات غاز الإحتراق.

S = سرعة اللهب للخليط.

S_a, S_b, S_C = سرعة اللهب لمكونات الغاز.

أقصى سرعة لهب للغازات العادية في الهواء في أنبوب بقطره 2.5 سم كالآتي:

الغاز	الغاز في أقصى سرعة للخليط (٪ للخليط)	سرعة إمتداد اللهب لأقصى سرعة للخليط ، سم /ث
H_2	38.5	485.00
Co	50.00	125.00
CH_4	90.00	76.00
Ethane	6.3	85.5
Ethylene	7.1	143.20
غاز فرن الكوك	17.1	158.8
غاز الإنتاج	51.00	73.20

أقصى سرعة للمسار المتجانس للهب في الخلط مع الهواء في الأنابيب الأفقية طبقاً للآتي:

الغاز	الغاز في الخليط (٪ بالحجم)	السرعة سم /ث	
		قطر الانبوب 2.5 سم	قطر الانبوب 5 سم
هيدروجين	38	490	-
Methane	9.5	66	91
Ethane	6.5	86	130
Propane	4.5	80	112
Butane	3.7	83	113
Pentane	3	82	115
Ethylene	7.2	142	-
Acetylene	8.9	182	-

حدود الإنفجار أو حدود قابلية الإلتهاب:

Explosive Limits Or Limits of Inflammability

لحرق وقود غازى فإنه يلزم مجال معين (أدنى واقصى) لتركيز الوقود الغاز فى خليط الغاز — الهواء.

مجال التركيز هذا للغاز — الهواء.

مجال التركيز هذا للغاز — الهواء يسمى حد قابلية الإلتهاب. أدنى قيمة لمجال التركيز تسمى الحد السفلى لقابلية الإلتهاب (أو الحد السفلى للإنفجار) وأقصى قيمة تسمى الحد العلوى لقابلية الإلتهاب (أو الحد العلوى للإنفجار).

فمثلاً، حدود القابلية للإلتهاب لغاز الفرن العالى هو من 37 إلى 71 ٪ للغاز فى خليط الغاز — الهواء. هذا الحد السفلى هو 37 ٪ والحد العلوى هو 71٪ من الغاز فى خليط الغاز — الهواء. وهذا يعنى أن خليط الغاز — الهواء الذى فيه لا يقل عن 37٪ غاز والباقى 63 ٪ هواء سوف يمسك باللهب ويحترق إذا تم تسخينه إلى درجة حرارة إشتعاله. على الجانب الآخر إذا كانت نسبة الغاز حتى 71 ٪ والهواء هو الباقى أى 29٪ ، عندئذ فإنه سوف يحترق كذلك . خليط الغاز — الهواء سوف لا يحترق إذا كانت نسبة الغاز أقل من 37٪ وأكثر من 71٪. وسوف يحترق فقط فى مجال التركيز من 37 إلى 71٪. حدود قابلية الإلتهاب لغاز فرن كذلك الكوك هو5–32 ٪، تلك للهيدروجين من 4–75°م وبالنسبة لأول أكسيد الكربون من 13 — 74 ٪.

حدود القابلية للإلتهاب معرضة طبيعياً للزيادة فى درجة الحرارة والضغط. ولكن، زيادة ضغط الغاز تعمل على تضييق حد الإنفجار لكل من CO ، H_2 والذى هو إستثناءاً.

خليط الوقود — الهواء / الأكسجين يصبح قابل للإلتهاب عند إنتاج الإحتراق. طاقة كافيه لإحداث إمتداد ذاتى مستمر للهب خلال المناطق الغير محروقه فى الخليط. بالنسبة لنظام الغاز — المؤكسد ليكون قابلاً للإلتهاب، فإنه يوجد حدود للضغط (أى حدود الإنفجار)، وحدود لدرجة الحرارة (أى حدود القابلية للإلتهاب). فى عدم وجود التأثيرات السطحية، فإن الحدود العليا للقابلية للإلتهاب تشير إلى الخليط الغنى والحد السفلى للقابلية للإلتهاب يشير إلى الخليط الأضعف نحو الإمتداد اللهب.

وجود حدين للقابلية للإلتهاب كان يتم توضيحه سابقاً بتحليل آليه درجة حرارة الإحتراق لخليط الوقود — المؤكسد. سرعة إمتداد اللهب تعطى كذلك نفس المؤشر — تقل سرعة اللهب على

كلا جانبي أفضل مكونات للوقود – المؤكسد. توجد سرعة حرجة للهب (10-12 سم /ث) التى دونها إمتداد اللهب يكون مستحيلاً بسبب تأثير الفقد الحرارى. اللهب يتقدم بمعدل عالى كافى لتعويض الفقد فى الحرارة. نظراً لأن السرعة الحرجة للهب تقابل كلا المكونين الغنى والضعيف للخليط، فإنه يوجد حدين للقابلية للإلتهاب ولكن خليط الوقود المؤكسد دون سرعة اللهب الحرجة قد يحترق عند نقطة ولكن اللهب سوف يختفى بعد السير مسافة قصيرة خلال الخليط القابل للإلتهاب.

حدود القابلية للإلتهاب للغازات/الأبخرة فى الهواء تكون كبيرة للحذر ضد أخطار اللهب والإنفجار. تركيزات الأبخرة والمذيبات والمواد الأخرى القابلة للإلتهاب فى الهواء المحيط أثناء إستخدامها يجب أن تظل خارج حدود القابلية للإلتهاب. حالياً، تستخدم مواد تخفيف مثل N_2، CO_2 ... إلخ، ليكون الجو دون حد القابلية للإلتهاب.

تعيين حدود القابلية للإلتهاب :

Determination Of Inflammability Limits:

حدود القابلية لإلتهاب الغازات / الأبخرة تتحدد بإحتواء الخليط الغاز / الهواء فى أنبوب (أنبوب زجاجى عمودى بقطر 75 مليمتر وإرتفاع 1.5 متر) ثم إشعاله بفتح الطرف السفلى واستخدام شرر أو لهب صغير. كلا حدى القابلية للإلتهاب أى الحدود العليا والسفلى (التركيزات المحددة) يتم تعيينهم فى الحالة التى عندها مجرد بدء عدم نجاح اللهب فى التقدم إلى أعلا، خلال كل طول الأنبوب.

العوامل ذات التأثير على حدود القابلية للإلتهاب :-

تتأثر خدود القابلية للإلتهاب بالضغط، درجة الحرارة، حجم الأنبوب، الوعاء، إتجاه إمتداد اللهب، سرعة إمتداد اللهب، المخففات (Diluents).. إلخ.

<u>تأثير الضغط</u>:

إنخفاض ضغط الخليط يعمل على تضييق حدى القابلية للإلتهاب. فهو يخفض الحد العلوى ويرفع الحد السفلى. ولكن، الحد العلوى يكون التأثير الواقع عليه يزيد عن الحد السفلى . تأثير الضغط ممكن شرحه بزيادة الإنتشار لحاملات التسلسل (Chain Carriers) والمنتجات الساخنة الاخرى نحو الجدار عند الضغط المنخفض. حدود القابلية للإلتهاب تميل إلى الإتصال عند الضغط الحرج الذى دونه يتوقف خليط الغاز – المؤكسد عن كونه قابل للإلتهاب عند أى تركيز.

تأثير درجة الحرارة:

حدود القابلية للإلتهاب لخليط يتم إتساعها بزيادة درجة حرارتها الأولية (أى التسخين المسبق) بدرجة كبيرة. هذا التأثير لدرجة الحرارة يتم شرحه بحقيقة أن درجة الحرارة المعززه إمتداد اللهب فى الخليط للمكون الغير موافق (Unfavorable Composition).

تأثير حجم الأنبوب الوعاء (Effect of Tube/Container size)

حدود القابلية للإلتهاب تضيق بخفض قطر الأنبوب إلى أقل من 5 سم بسبب تأثير الجدار (Wall Effect). حجم الأنبوب / الوعاء ليس له تأثير لقطر أكبر من 5 سم. أدنى حجم للأنبوب الذى دونه لا يحدث إمتداد للهب عند درجة حرارة وضغط الغرفة يتوقف على غازات الوقود (مثل H_2 – 0.9 مليميتر، CH_4 – 4 مليميتر ، CO – 2.5 مليميتر).

تأثير إتجاه إمتداد اللهب:

Effect of Direction of Flame Propagation

التغير فى حدود القابلية للإلتهاب بسبب التغير فى إتجاه إمتداد اللهب يرجع إلى تأثير الطفو (Buoyancy Effect) أوسع حدود القابلية للإلتهاب يتم الحصول عليها إذا كان اللهب ليمتد إلى أعلا وأدنى حدود تنتج فى حالة إمتداد اللهب إلي أسفل. النتائج المتوسطة تكون بواسطة الأنابيب الأفقية والمائلة.

تأثير سرعة اللهب:

عموماً، إرتفاع أقصى سرعة طبيعية لإمتداد اللهب خليط الغاز – المؤكسد القابلة للإحتراق، يعنى زيادة الإتساع لحدود القابلية للإلتهاب. ولكن أول أكسيد الكربون يعتبر إستثناءاً. رغم أن أقصى سرعة لهب له هى أقل من 0.5 سم/ث. فله حدود واسعة جداً لقابلية الإلتهاب فى الهواء (12.5 إلى 74٪ الغاز فى خليط الغاز – الهواء).

تأثير المخففات:

وجود المخفف مثل CO_3، N_2، He، Ar .. إلخ. فى خليط من الغازات يضيق إلى أسفل حدود القابلية للإلتهاب بسبب تأثير مواد التخفيف على الإمتداد إلى حد أكبر أوأقل.

H_2 (4 – 75 %)، Ethylene Oxide (3 – 80 %)، Acetylene

(2.5 – 80 %) له مجال قابلية للإلتهاب متسع جداً بينما بخار الجازولين (1.4 – 7٪).

البنزين (1.4 – 7.1٪) ، Hexane (1.2 – 7.5 %) ، Acetone(3 – 11 %)... إلخ لهم حدود ضيقه لقابلية الإلتهاب.

معادلة حساب حد القابلية لإلتهاب خليط الغاز:

حدود القابلية للإلتهاب لخليط الغازات القابله للإحتراق في الهواء يكون طبقاً للمعادلة.

$$L=\frac{100}{(X_1/L_1)+(X_2/L_2)+(X_3/L_3)+....}$$

L= حد (سفلي أو علوى) القابلية للإلتهاب للخليط فى الهواء تشبه مثوية.

L_1,L_2,L_3= حد القابلية للإلتهاب (السفلي أو العلوى) للغازات النقية

X_1,X_2,X_3 = حجم ٪ للغازات القابلة للإحتراق في الخليط.

حدود القابلية للإلتهاب للغازات القابلة للإحتراق (Combustibles) المحتويه على مخففات (خاملة) يتم حسابها بالآتى:

$$L_1'=L_1\times(\frac{100}{100-Xd})$$

و

$$L_2'=L_2\times(\frac{100}{100-Xd})$$

ذلك إذا كان الهواء المخفف.

و

$$L_2'=L_2\times\frac{1000L}{100\times c-L_2(100-Xc)}$$

إذا لم يكن هناك أكسجين فى المخفف.

و

$$L_2'=\frac{2100\,L^2}{21Xc-L_1(X_{o2}+0.21X_c-21)}$$

بخلاف الهواء (يحتوى أكسجين).

حيث : L_1,L_2 = الحدود العليا والسفلى للقابلية للإلتهاب للمواد النقية القابلة للإحتراق.

L_1',L_2' = الحدود العليا والسفلى للقابلية للإلتهاب للمواد القابلة الإحتراق المحتوية على مخفف.

X,X_d,X_{o2} = نسبة المحروق، المخفف ، الأكسجين على التوالى فى المحروق المحتوى على المجفف.

الحد السفلى لخليط المواد القابلة للإحتراق يمكن حسابه بدقه ولكن يوجد هناك حيود كبير

ما بين القيمة المحسوبة والقيم التجريبية للحد العلوى للخليط. وهو يبين أن المواد القابلة للإحتراق تتفاعل خاصة عندما تكون موجودة في كميات كبيرة كما في الحد العلوى للقابلية للإلتهاب الحساب التقريبي لحدود القابلية للإلتهاب للمواد للإحتراق (Combustibles) المحتويه على مخففات (Diluents) يكون مبيناً على حقيقة أن الحد السفلى هو حقيقة معيار لتركيز المواد القابلة للإحتراق بينما الحد العلوى هو ذلك للنسبة ما بين المواد القابلة للإحتراق والأكسجين.

مثال:

إحسب حدود القابلية للإلتهاب في الهواء لخليط الغاز المحتويه على (القابله للإحتراق فقط. 30 ٪ CO، 45 % H_2، 25 % CH_4 ، الحدود السفلى (L_1) والعليا (L_2) للقابلية للإلتهاب للغازات فى الهواء كما فى الجدول التالى:

الغازات	(L_1) الحد السفلى للقابلية للإلتهاب	(L_2) الحد العلوى للقابلية للإلتهاب
CO	12.5	74
H_2	4	75
CH_4	5.3	14

الحل:

نظراً لأن كل مكونات خليط الغازات قابله للإحتراق لذلك فيكون لدينا:

$$\%5.45 = \frac{100}{\frac{25}{5.3}+\frac{45}{4}+\frac{30}{12.5}} = \textit{للخليط} \qquad (L_1)$$

$$\%32.2 = \frac{100}{\frac{25}{14}+\frac{45}{75}+\frac{30}{74}} = \textit{للخليط} \qquad (L_2)$$

هنا الحدود السفلى العليا للقابلية للإلتهاب لخليط الغازات هو 5.45٪،35.2٪ على التوالى.

مثال:

إحسب حدود القابلية للإلتهاب فى الهواء الغاز فرن الكوك حيث المكون الحجمي وحدود القابلية للإلتهاب لمكوناته القابله للإحتراق هو كالآتى:

المكونات	CH_4	H_2	CO	CO_2	N_2
النسبة بالحجم ٪	25	55	10	5	5
الحد السفلي (L_1)	5.3	4	12.5	مخفف	مخفف
الحد العلوى (L_2)	14	75	74	–	–

الحل:

(جدول) درجة حرارة الإحتراق،حد الإنفجار وأقصى درجة حرارة لهب بدون الفقد الحرارى لبعض الوقود الغاز.

الوقود / الغازات	أقصى درجة حرارة لهب بدون فقد حرارى°م		درجة حرارة الإحتراق°م		حد الإنفجار ٪ بالحجم	
	فى الهواء	فى الأكسجين	فى الهواء	فى الأكسجين	فى الهواء	فى الأكسجين
CO	2100	2925	609	588	12.5	74
H_2	2045	2660	572	560	4	75
CH_4	1875	–	632	556	5.3	14
C_2H_6	1895	–	472	–	3	12.5
C_2H_2	2325	3137	305	296	2.5	80
C_6H_6	–	–	850	566	1.4	7.1
C2H5OH	–	–	392	–	4.4	19
غاز الفحم	1918	–	–	–	5.3	32
غاز الماء	1930	–	–	–	7.00	72
غاز الإنتاج الكوك	1663	–	–	–	17	70
غاز الفرن العالى	1460	–	560	–	5	32
الغاز الطبيعي	1930	–	–	–	4.8	13.2
الجازولين	–	–	280	–	1.4	7.6
الكيروسين	–	–	254	–	–	–
الفحم النباتى	–	–	350-250	–	–	–
الخشب	–	–	300	–	–	–

اللجنيت	–	–	350-250	–	–	–
فحم البيتومين	–	–	420- 380	290 -270	–	–
الإنتراثيت	–	–	500	340	–	–
الكوك الطرى	–	–	500 – 425	–	–	–
الكوك الصلب	–	–	600 – 500	–	–	–
غاز الفرن الكوك	2000	–	560	–	5	32

هنا كلا من CO، N_2 مخففات.

تركيز المخففات (أى CO، N_2) = 5 + 5 = 10 %.

مكونات الخليط القابل للإحتراق والخالى من المخففات.

$$CH_4 = 25 \times \frac{100}{100-10} = 27.8\%$$

$$H_2 = 55 \times \frac{100}{100-10} = 61.18\%$$

$$CO = 10 \times \frac{100}{100-10} = 11.1\%$$

حدود القابلية للإلتهاب لخليط الغاز الخالى من المخففات هى:

L_1(للخليط خالى من المخفف) = $$L_1 = \frac{100}{\frac{11.1}{12.5} + \frac{61.1}{4} + \frac{27.8}{5.3}}$$

$$= 4.57\ \%$$

L_2(للخليط خالى من المخفف) = $$L_2 = \frac{100}{\frac{11.1}{74} + \frac{61.1}{75} + \frac{27.8}{14}}$$

$$= 33.9\%$$

لذلك فإن القابلية للإلتهاب لغاز فرن الكوك يكون

$$L_1 = 4.67 \times \frac{100}{100-10} = 5.2\%$$

$$L_2 = 33.96 \times \frac{100}{100-10} = 37.7\%$$

لذلك فإن الحد السفلى والعلوى للقابلية للإلتهاب لغاز فرن الكوك هو 5.2 ٪، 37.7٪ على التوالى.

نسبة منحنى الهبوط للموقد

Turn Down Ratio of The Burner

في موقد الخلط المسبق Premix Burner حيث الهواء الأولى والوقود الغازى يختلطا قبل الدخول في الفرن، إذا كانت سرعة خليط الغاز- الهواء مرتفعة عندئذ فإن اللهب يترك طرف الموقد بينما إذا كانت السرعة بطيئة جداً أى أقل من سرعة اللهب عندئذ فإن اللهب يتحرك إلى الخلف داخل الموقد (والذى ارتداد اللهب- Back Firing) كلا الحالتين غير مرغوب فيهما.

ترك اللهب يحدد أقصى خرج للموقد بينما ارتداد يحدد أدنى خرج للموقد. لذلك فإن نسبة منحنى الهبوط للموقد تعرف بالآتى:

$$\text{نسبة منحنى الهبوط للموقد} = \frac{\text{أقصى خرج للموقد}}{\text{أدنى خرج للموقد}}$$

وقيمته هو عموماً 5 = 1 لمعظم الأفران ذات الإشعال بالغاز.

طبيعة وشكل وحجم اللهب :

Character, Shape and Size of the Flame

غازات الوقود التى تحترق بسرعة إحتراق عاليه سوف تنتج القليل جداً من التألق بصرف النظر عن نوع الغاز. يحترق كلا من CO، H_2 بلهب صافي غير مرئي بينما غازات الهيدروكربونات تحدث لهب عالى التألق بسبب التكسير الحرارى إلى C، H_2. جسيمات الكربون التى يتم تسخينها إلى التوهج حيث تعطى اللهب المظهر المتألق.

نقص الهواء يزيد من تألق وطول اللهب. زيادة الهواء تقلل من التألق وطول اللهب.

التسخين المسبق لهواء الإحتراق يقلل التألق. استخدام البخار فى عملية الترزيز (Atomization) يقلل كذلك من التألق. اللهب المتألق له قدرة أكبر لتقل الحرارة بالإشعاع من مستوى درجة حرارة ثابت. إنتقال الحرارة بالإشعاع يتغير عكسياً مع مربع المساحة بين المرسل والمستقبل لطاقة الإشعاع.

إحتراق الوقود الصلب:

أثناء الإحتراق للوقود الصلب/الفحم فى أفران الإشعال بالوقاد الآلى (Stoker Fired Furnaces) (المستخدمة فى إشعال الفحم حتى 50 طن / الساعة) يتم أولاً طرد المادة المتطايرة وتتم أكسدة الكربون فى المتبقي لإنتاج CO، CO_2.

المادة المتطايرة ، CO يتم حرقها فوق المصبعه الحديدية (Grate) بواسطة الهواء الثنائى الذى يدخل فوق طبقة الوقود. درجة حرارة طبقة الوقود وعند قمة (الجزء الأكثر سخونه للطبقة) تتغير من 1230°م (عند المعدلات المنخفضة) إلى 1510°م (عند المعدل الحالى). طاقة فرن الإشعال بالوقاد الآلى يتم تعيينها بكمية الهواء الأولى والإستخدام المؤثر للهواء الثانى يحدد مقدار (n) للإحتراق. تقريباً هواء زائد من 20 – 30 ٪ يسمح بحرق الغازات خلال 2-2.5 متر فوق المصبعه الحديدية.

الوقاد الآلى (Stokers) تقسم طبقاً لمسار الوقود:

فى الوقاد الآلى عالى الحريق (Over Fired Stoker) تتم التغذية بالوقود على قمة الطبقة.

فى الوقاد الآلى منخفض الحريق أو وقاد المعوجه:

In Under Fired Or Retort stoker.

يكون التغذية بطبقة الوقود عند القاع أو جانب الطبقة مصبعه الوقاد الآلى المتحركة أو السلسلة تحمل الطبقة أفقياً على السطح العلوى المستوى للناقل.

تطوير هذه الأنواع فى الوقاد الآلى الناشر (Spreader Stoker) الذى يدفع الفحم نحو الفرن فوق طبقة الوقود ويتم حرق الوقود فى كل من العالق وعلى طبقة الوقود.

طبقة الوقود فى فرن الإشتعال بالوقاد الآلى رقيقة نسبياً (25-75 سم) مقارنة لطبقة إنتاج الغاز (Gas Producer) ولكن تحدث مناطق تفاعل مشابهة.

فى الوقاد الآلى عالى الحريق تكون منطقة الرماد فوق المصبعه الحديدية مباشرة التى تحمل وقود الفرن، يليها منطقة الأكسدة، لإختزال التقطير.

فى الوقاد الآلى منخفض الحريق، تقطير المواد المتطايرة يحدث فى جو مؤكسد والمواد المتطايرة تمر خلال متبقي متوهج من الإحتراق وليس خلال الفحم الأخضر، كما فى حالة الوقاد الآلى عالى الحريق.

المعدل العادى للإحتراق على الفحم على وقاد الإشعال الآلى هو من 15-30 كجرام غحم/القدم المربع من مساحة المصبعة الحديدية الحامله للوقود/ الساعة.

إحتراق الوقود الغازى :

درجة الخلط للغاز والهواء يتم التحكم فيها طبقاً لتصميم الموقد.

المواقد تم تطويرها لإنتاج لهب قصير، كثيف، غير وهاج إلى اللهب الطويل الوهاج بطئ الإحتراق هذه العلاقة لا تتحقق دائماً حيث الغاز يجب أن يحتوى على الهيدروكربونات لإحداث الوهج.

المواقد القادرة على إنتاج مستوى قصير، كثيف سوف تنتج كمية كبيرة من الطاقة فى فضاء صغير. بعض الغازات (مثل غاز CO) له معدل عالى لإطلاق الحرارة بينما غاز آخر (مثل غاز الفرن العالى له معدل منخفض جداً لإطلاق الحرارة.

طول اللهب يتحدد بقدرة اللهب على توفير الحرارة الكافيه لإمتداده. حاملاً الزائد أو القليل من الهواء يتم عادة لإحكام تكون القشور (Control Scale Formation) وأحيا لإحكام خواص اللهب.

الهواء الزائد يقصر اللهب ويسبب فقد فى الحرارة. نقص الهواء يطيل اللهب وينتج عنه فقد فى الوقود بالإحتراق الجزئى.

الوقود المحتوى على (H_2) يجب أن يكون له أعلا درجة حرارة خروج من المدخنه، لتجنب تكثيف الماء خلال نظام الفرن وبالتالى التآكل لأجزاء الفرن. أحياناً يكون من الضرورى حرق الوقود بالهواء الزائد لإستمرار الغازات العادمة فوق نقطة الندى لها.

إحتراق الوقود السائل :

الإحتراق الذى يتم بالترزيز (Atomization) والذى يعمل على تفتيت الوقود إلى حبيبات بما يزيد من مساحة الإلتصاق بين الهواء والوقود.

الجسيمات الصغيرة للوقود السائل أما أن تتجزأ لتكوين غازات هيدروكربونية لتحرق إلى CO، H_2O أو لتكسر لتكوين كربون، H_2 والذى بالتالى يحترق إلى CO_2، H_2O عند إكتمال الإحتراق.

الحالة الأولى: تسود مع الترزيز الجيد والخلط الجيد مع الهواء الكافى. النقص فى الهواء أو ضعف الترزيز يسبب الدخان.

عامل الترزيز : Atomizing Agent

فى الأفران الضخمة إذا كان البخار عند4-10 كجرام/سم^2، فإن الإستهلاك يكون 0.3 – 0.7

كيلو جرام/كيلوجرام وقود.فى الأفران الأصغر يتم الترزيز بالهواء المضغوط أو بالأداء الميكانيكي.

شكل وحجم ووهج لهب الوقود السائل لتصميم ثابت الموقد يتغير بتغير درجة الترزيز التى يتم التحكم فيها بالنسبة ما بين ضغط البخار/ضغط الهواء.

مواقد الوقود السائل:

المواقد المستخدمة للبخار أو الهواء للترزيز تنقسم إلى:

نوع الخلط الداخلى:

هنا يتم خلط الوقود والبخار / الهواء داخل نظام الموقد. هذا الموقد يستخدم فى أفران المجمرة المكشوفة (Open Hearth Furnaces) وأفران إعادة التسخين الضخمة. فهى تسمى كذلك نوع الإستحلاب أو نوع الموقد بفنيه الخلط (Nozzle Mix).

نوع الخلط الخارجى :

هنا الوقود والهواء / البخار يتقابلا فى الحال خارج طرق الموقد.

أنواع عمليات الإحتراق (Types of Combustion Processes)

الطاقة الكامنه للوقود تنطلق بعملية الإحتراق والتى هى كيميائية بطبيعتها متضمنه تفاعلات مكونات الوقود مع الأكسجين. تتضمن حرارة التفاعل وترتفع درجة حرارة نواتج الإحتراق (والتى هى فى شكل غاز / بخار). وتميل إلى أن تشغل حجماً كبيراً عند الوصول إلى درجة الحرارة الزائدة أو توليد ضغط عالى إذا كان الحجم لا يسمح بالزيادة.

تتصف عمليات الإحتراق بتكوين لهب (المنطقة الساخنه والمنبعث منها غازات خفيفة والتى تفصل نواتج الإحتراق من الوقود). يظهر اللهب بعد إشعال الوقود مباشرة وإنتاج درجة حرارة مرتفعة كامنه، ويميل إلى أن المثايرة إلى ما بعد منطقة الحرق قليلاً لحين حدوث هبوط فى درجة الحرارة والذى يجعل الغازات غير مضيئة تماماً. لذلك فإن اللهب يغطى الحرق المضئ وبعد مناطق الحرق يكون محصوراً ما بين منطقة الحرق وغازات الإحتراق الغير مضيئة تماماً. لهب بنزين الغير مضئ هو حقيقية لهب ذو إضاءة منخفضة. مقدمة اللهب هى السطح ما بين منطقة الإضاءة والوقود الغير محروق. مقدمة اللهب التى يمكن تمييزها جيداً يتم الحصول عليها بالوقود الغازى. يتوقف سمك اللهب أو طول اللهب على عوامل كثيرة، مثل نوع الوقود، وجود مخففات (النيتروجين فى الهواء، تدوير الغازات العادمة)، شدة الخلط للوقود المؤكسد، وغالباً يحدث

الإحتراق والإضاءة فى توقيت واحد نظراً لأن اللهب يفصل الوقود عن نواتج الإحتراق فإنه منطقة التركيز حادة الإنحدار والتدرجات فى درجة الحرارة. تلك هى الصفات التى تميز اللهب عن التفاعلات الكيميائية عموماً.

بسبب إضاءة اللهب، فإن بعض الوقود مثل الكيروسين تستخدم فى الإضاءة. تجهيزات معينة مثل الرتينه (Mantle) تستخدم لتعزيز إضاءة اللهب.

يوجد العديد من عمليات الإحتراق التى تعتمد على وسائل الإلتصاق للوقود مع المؤكسد وظروف اللهب. هذه ستم وصفها بإختصار كالآتى:

الإحتراق باللهب الثابت: (Combustion With Stationary Flame)

هذه هى عملية الإحتراق العادية التى تتم فى الأفران. مقدمة اللهب الناتجة هى إلى حد ما ثابته فى الفضاء. اللهب الثابت يمكن أن يكون سابق خلطه (Premixed) أو منتشر (Diffusion). فى النوع السابق خلطه، يتم الخلط المسبق للوقود والمؤكسد قبل دخولهم إلى منطقة الحرق. عند إمداد بالوقو الهواء كل على حدى إلى منطقة الحرق، فإن اللهب يسمى لهب الإنتشار (Diffusion Flame) عملياً، يمكن الخلط المسبق لجزء من الهواء الكلى مع الوقود والباقى يمكن إمداده مباشرة إلى منطقة الخلط. الهواء السابق خلطه يسمى الهواء الأولى والباقى يسمى الهواء الثنائى. رغم أن الوقود الصلب، السائل، الغازى جميعاً يمكنهم إعطاء لهب سابق خلطه، إلا أن لهب الإنتشار الحقيقى يتم الحصول عليه بالوقود الغازى فقط.

اللهب الثابت يمكن أن يكون رقائقى (Laminar) أو مضطرب (Turbulent) طبقاً لسرعة نظام الخلط المسبق. فى حالة لهب الإنتشار فإن كلا من إتجاه التدفق وسرعة الوقود والمؤكسد هى التى تحدد طبيعة اللهب. لهب الإنتشار الرقائقى يتم تعزيزه بالسرعة البطيئة والمتساويه والتدفق الموازى للغاز والهواء. عند تدفقهم بزاوية واحد بالنسبة للآخر مع زيادة وعدم تساوى السرعة فإنه يحدث لهب عالى الإضطراب الإنتشار.

عموماً، لهب الإنتشار يمكن أن يكون أضخم كثيراً مقارنة بلهب الخلط المسبق بالنسبة للظروف المشابهه للحرق. اللهب الرقائقي يكون أطول من اللهب المضطرب. اللهب عالى الإضطراب يكون غير مستقراً أو ذو شكل غير منتظم. عند الإغلاق الكامل لثقب الهواء لموقد بنزن، فإنه يتم الحصول على لهب رقائقي منتشر والذى يكون طويلاً، هادئ، بدون صوت، ذو شكل جيد، ومضئ. فى حالة الفتح الكامل لثقب الهواء الكبير، فإنه ينتج لهب مضطرب سابق خلطه

الذى يكون قصيراً، غير ثابت، محدث للصوت، مرتعش، ذو شكل غير منتظم وذو إضاءة ضعيفة.

في التسرب علي غير مثل اللهب السابق خلطه فإن كلا من الوقود والهواء يمكن تسخينهم المسبق مثل الإحتراق. للحرق الشديد فى فضاء قصير نسبياً والذى هو الهدف فى المهمات الحرارية، فإنه نادراً ما يستخدم لهب إنتشار، رقائقى حقيقي. ولكن ، يكون المطلوب لهب طويل فى فرن الكوك وفرن المجمرة المكشوفة حيث يكون المرغوب فيه وجود لهب طويل الإستقرار وإمتداد منطقة درجة الحرارة المتجانسة.

الإحتراق السطحى : (Surface Combustion)

كل الأسطح الحرارية الصلبة عند درجات الحرارة العالية تعجل معدل الإحتراق للوقود الغازى والهواء. بعض المواد مثل البلاتين يمكن أن يعجل العملية حتى عند درجات الحرارة المنخفضة. الإحتراق باللهب الثابت يكون محدوداً بمجال السرعة وظروف التركيز للغاز والهواء. الإحتراق المستقر يكون ممكناً حتى خارج هذا المجال، فى حالة تقدم التفاعل بالإلتصاق مع الأسطح الصلبه. هذا يسمى الإحتراق السطحى. تطبيقاته الصناعية هى للحصول على إحتراق سريع لكمية ضخمة من الوقود فى فضاء صغير نسبياً مع إنتاج درجة حرارة مرتفعة ومعدل عالى للإنتقال الحرارى . الموقد النفقى (Tunnel Burner) هو نوع من الموقد بالغاز الذى يعمل على مبدأ الإحتراق السطحي حيث لا يوجد فيه اللهب العادى.

الإحتراق المغمور: (Submerged Combustion)

الإحتراق المغمور هو حالة خاصة من عملية الإحتراق السطحى حيث فيه يكون الموقد مغموراً جزئياً فى السائل والنواتج الساخنه للإحتراق تحدث فقاعات خلال السائل فى حالة تقليب تنتج حالة من الإنتقال الحرارى العالى من الإلتصاق المباشر للغازات الساخنه مع السائل بما يؤدى إلى إرتفاع معدل البخر حتى 95٪ من الحرارة الكامنه للوقود يمكن أن تكون حرارة مفيدة للعملية. الإحتراق المغمور وجد تطبيقات في تبخير من المحاليل / السوائل شديدة الترسيب والعدوانية.

الإحتراق بإنفجار اللهب: (Combustion with Explosion Flame)

الإحتراق بإنفجار اللهب يحدث فى الخليط المتجانس للوقود والهواء ويتصف بمقدمة اللهب المتقدمة سريعاً خلال الخليط. العملية يمكن أن تكون أما ضغط ثابت مثل إنفجار اللغم ، أو حجم ثابت مثل الإنفجار فى محرك البنزين. الإشتعال التفجيري (Detonation) هو نوع خاص من

الإنفجار (Explosion)، حيث معدل التفاعل العالى جداً يولد موجات ضغط ذات سرعة عالية (1-4 كيلومتر/الساعة) وعند معدل غير عادى لإرتفاع الضغط.

الإحتراق النبضى : (Pulsating Combustion)

يحدث الإحتراق النبضى عندما تكون أحد نهايات الأنبوب الطويل مفتوحه والأخرى تكون مقفلة بواسطة محبس عدم رجوع، حيث يدخل الهواء والوقود عند النهاية المقفلة. عند الإشعال، يرتفع الضغط فى النظام بشدة وعند حجم ثابت تقريباً حي يمنع تدفق الهواء والوقود لحظياً، وعند مغادرة الغازات العادمة الأنبوب خلال الطرف المفتوح فإنه يصل إمداد حديد من الهواء والوقود عند المنطقة الساخنه حيث يتم تكرار الإحتراق فى شكل نبضات والتى ترددها يقابل تردد الرنيني لوحدة الإحتراق. لا يوجد لهب ثابت فى النظام. الإحتراق النبضي هو نوع خاص من لهب الإنفجار. أثناء عمل وحدة الإحتراق النبضى، يتم الحصول على موجه ضغط ثابته فى الأنبوب بضغط نقطة السكون (Pressure Node) (بطن الموجه Velocity Antinodes) عند طرف المخرج وضغط بطن الموجه (Pressure Antinodes) (نقطة سكون السرعة Velocity Node) عند أو قريباً من منطقة الإحتراق. نظام الإحتراق النبضي يعطى معدلات أعلا للإحتراق وإنتقال حرارى أعلا مقارنة بالموقد التقليدى. مستويات الصوت للإحتراق النابض يمكن خفضه باستخدام أجهزة كاتم الصوت البسيطة (Simple Silencers) .

الإحتراق البطئ : (Slow Combustion)

الإحتراق البطئ يحدث عند درجات حرارة دون حرارة اللهب (أقل من 400°م) عند معدلات بطيئة ولكن محددة، الإحتراق البطئ للهيدروكربونات العاليه يفيد فى تعيين معدلات تفاعل التسلسل. فى نظام الخلط السابق لبخار الوقود والهواء، يتقدم الإحتراق البطئ عند عدد من النقط فى نفس الوقت فى كل النظام. لا يتم رؤية منطقة تفاعل أو مقدمة لهب. هذه العملية تسمى الإحتراق المتجانس والذى يتصف عادة بظهور لهب معتدل البرودة (Cool Flames) بالتتابع الذى يبعث كميات صغيرة من الحرارة وضوء يميل إلى الزرقه وشاحب عادة يرى فقط فى الظلام. عدة لهب معتدلة البرودة (حتى أربعة) قد تتبع واحد بعد الآخر.

اللهب المعتدل هو ظاهرة أكسدة المجال الغازى للمواد العضوية أقل من 400°م الإحتراق البطئ ليس له إستخدام صناعى مباشر. ولكن، فهو مفيد بطريقة غير مباشرة فى دراسة آلية الإحتراق.

إحتراق كتل (كومه) الوقود الصلب على المصبعات الحديدية:

Combustion Of Solid Fuel Lumps On Grate

إحتراق الكتل من الوقود على المصبعات الحديدية (التى توضع كل واحدة موازيه للأخرى) الذى يمر فيها الهواء الأولى خلال الفتحات بين قضبان المصبعة الحديدية وهى طبقة بنفسها. طبقة الوقود المتوهجه مع طبقة الرماد أسفلها تظل على المصبعة والتغذية بشحنه جديدة تتم فيها من وقت إلى آخر بما يقابل معدل الإحتراق. طبقة الرماد العازلة تحمى قضبان اللهب من شدة الحرارة وكذلك تساعد فى توزيع الهواء.

الشحنه الطازجه عند التسخين يحدث لها تجفيف وتحلل والمواد المتطايرة القابله للإحتراق يتم حرقها فى فضاء الإحتراق الثانوى فوق طبقة الوقود بواسطة الهواء الثنائى. هذا الإحتراق إلى حد ما يناسب فى عملية اللهب الثابت. الوقود الصلب المتبقى يحدث له إحتراق حقيقي أولى على المصبعة. وهى عملية سطحية متضمنه تفاعلات غير متجانسة بين الكربون والأكسجين. الحرارة المنطلقة تحول الوقود إلى كتلة متوهجة التى تشع الحرارة إلى سطح التسخين وكذلك إلى شحنه الوقود الطازجه. أول أكسيد الكربون هو ناتج الإحتراق على المصبعه ويشارك فى الإحتراق الثنائى.

الطريقة السابقة لحرق الوقود الصلب معروف أنها الإشعال بالتغذية (العلويه Overfeed Firing). فى الإشعال بالتغذية السفلية (Under Feed) حيث يتم الإمداد بالوقود الطازج من أسفل. فى الإشعال بالتغذية المتقاطعة (Cross Feed Firing) تتم التغذية بالوقود إستعراضياً (Transversely) خلال مقدمة المصبعة.

الإحتراق بالبثق السفلى (Down Jet Combustion):

حيث المصبعة تكون موزعه بتيار الهواء الذى يصطدم على سطح طبقة الوقود. أجناب وقاع الطبقة تكون مقفلة. نواتج الإحتراق تترك الطبقة خلال السطح العلوى. تتم التغذية بالوقود الطازج من أعلا بينما يتم سحب المخلفات من آن إلى آخر من القاع.

مبدأ الإحتراق بالبثق السفلى ليس ناجحاً عملياً بسبب الصعوبة فى إزالة الرماد.

2

الفصل الثانى

إحتراق الوقود الصلب / نظم إشعال المصبعة وإشعال الوقود المطحون

Combustion of Solid-
Grate Firing and Pulverized Fuel Siring System

عند إلتصاق الفحم والهواء مع بعضهم البعض عند درجة حرارة الإشتعال، عندئذ يتحلل الفحم إلى الكربون المثبت والمادة المتطايرة مسبباً إشتعال الكربون المثبت. عندئذ يصبح الإحتراق ذاتى أى إنبعاث الحرارة الكافيه لإستمرار هذه الحالات.

التحكم فى الإحتراق : (Combustion Control)

لحرق كل المادة القابلة للإحتراق فى الفحم، فإنه يتم التحكم فى الإمداد بالهواء بدون إستخدام زائد غير ملائم. فى حالة الإمداد بالهواء القليل جداً فإن بعض المواد القابله للإحتراق مثل الهيدروجين ، الهيدروكربون، سناج الكربون (Carbon Soot) وأول أكسيد الكربون. إلخ يترك الفرن بدون إحتراق لذا تقل كفاءة الفرن. فى حالة إستخدام الكثير من الهواء، فإن كفاءة الإحتراق تقل بسبب الحرارة اللازمة لرفع الهواء الزائد إلى درجة حرارة الغاز العادم.

معدل إحتراق الفحم على المصبعات يتعيين أساساً بمعدل الإمداد بالهواء والذى يتم إحكامه بتيار السحب (Draught) المتاح فى الفرن. السحب اللازم فى الفرن يتوقف على المص (Suction) أو الضغط المتاح من المدخنه أو المراوح ومقاومة تدفق الهواء نحو الفرن وللغازات العادمة من الفرن الناتجه بالوقود على المصبعات وبحجم وشكل الفرن، عناصر التسخين، المداخن للتصريف.

نوعين من الهواء يتم إمدادهم لحرق الفحم على المصبغه بكفاءة وهم:

الهواء الأولى: يتم إدخاله أسفل المصبعه لحرق الكربون المثبت للفحم.

الهواء الثنائى: يتم إدخاله فوق المصبعه لحرق المواد المطايرة المنتجه من الفحم.

أحياناً، عند إرتفاع عالى فوق المصبعه يتم إدخال الهواء الثلاثى لحرق المتبقى من المادة المتطايرة والدخان والذى لم يتم إحتراقه كاملاً بواسطة الهواء الثنائى إما بسبب عدم كفايته أو عدم الخلط الجيد للمادة المتطايرة معه.

تزداد نسبة الهواء الأولى إلى الهواء الثنائى مع زيادة رتبه الفحم بسبب زيادة نسبة الكربون المثبت إلى المادة المتطايرة. خاصية التكويك للفحم تؤثر كذلك على مقاومة التدفق للهواء الأولى الذى تقدمه طبقة الوقود. يلزم الوقت الكافى للهواء ليتفاعل مع الجسيمات الصلبه للكربون المثبت على المصبعه والغازات المتطايرة فوق المصبعه. الأول يتوقف على سمك طبقة الوقود وتفاعليه الكربون المثبت والذى يكون عالياً للفحم ذو الرتبه المتدنيه ومنخفضاً لفحم الرتب العاليه. الآخر يتوقف على خلط الهواءمع الغازات العادمة وعلى شكل وحجم غرفة الإحتراق. الإضطراب فى غرفة

الإحتراق يحسن من خلط الهواء مع الغاز والذى يمكن تحقيقه بتوجيه نافورات الهواء الثنائى إلى أسفل نحو المصبعه أو بإمداد هذا الهواء بحركه دورانية.

الزيادة فى إمداد الهواء البارد يسبب تكون الدخان الأسود أو سناج الفحم بسبب تكسير غازات الهيدروكربونات والإحتراق الغير كامل. رغم أن القيمة الحرارية للدخان يمكن إهمالها ولكن قيمة الإزعاج ذات قيمة. الفحم ذو المحتوى العالى من المواد المتطايرة معرض لإنتاج دخان اسود بينما الفحم ذو المحتوى الضعيف من المواد المتطايرة (أو فحم الكوك) من الصعب إنتاجه للدخان. الإمداد بالهواء السابق لتسخينه بكميات محكمه، مع التصميم الجيد للفرن يمنع تكوين الدخان الأسود.

نظم إشعال المصبعات (Grate Firing Systems)

عادة يتم حرق كتل الوقود الصلب على المصبعات. النظم المختلفة للتغذية العلوية (والتى تشمل الإنتشار بالرش ووقاد الكوك)، المصبعه المتحركه ذات وقاد مصبعه السلسلة، والتغذية السفلية أو وقاد المعوجة. الإشعال اليدوى يتم عندما يكون الخرج الحرارى للفرن منخفضاً.

الوقاد بالتغذية العلوية: Over Feed Stokers

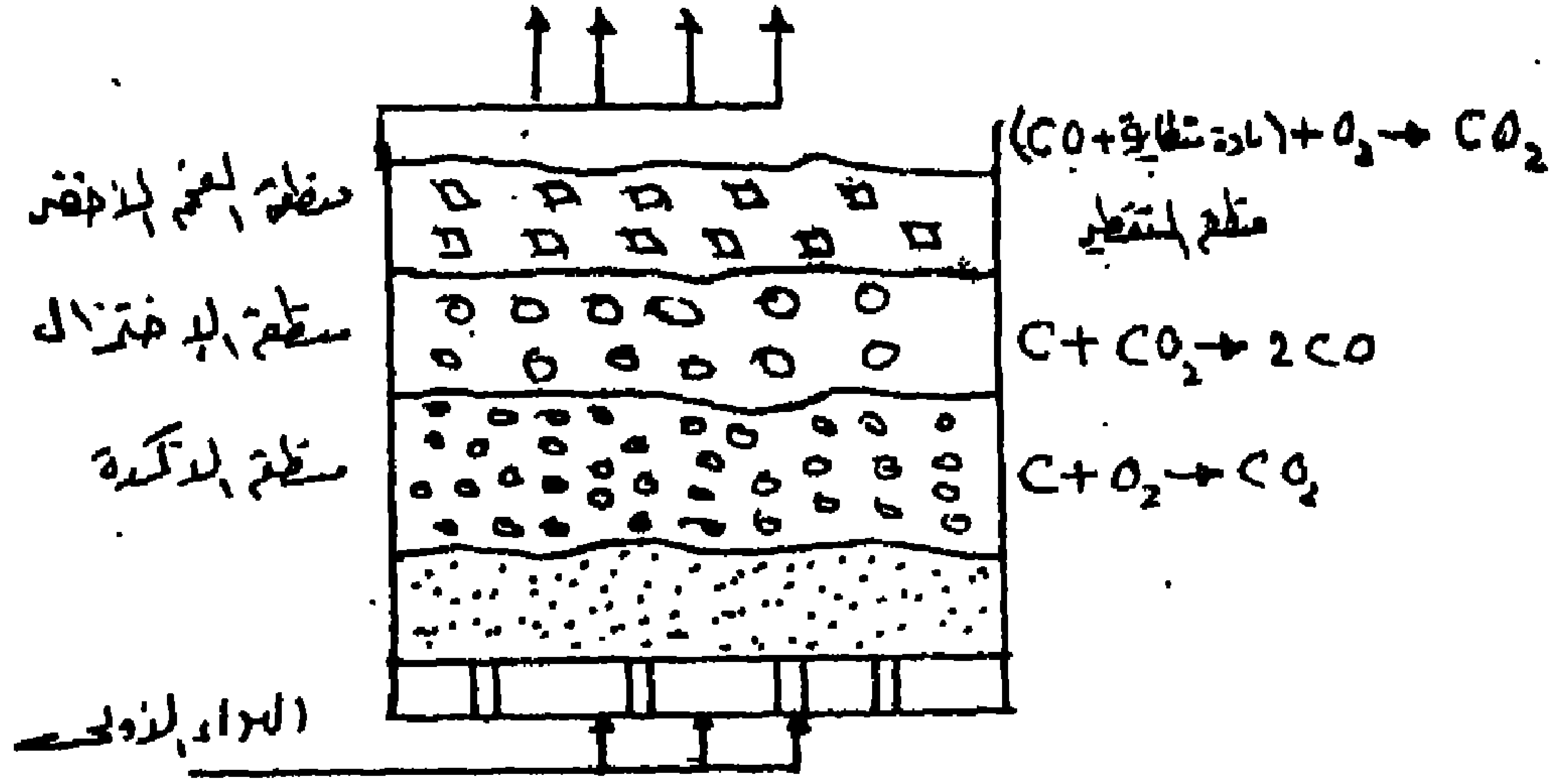
فى هذا النظام تتم تغذية الفحم الطازج أو الأخضر بإسقاطه على طبقة الوقود. فى نظام الإنتشار بالرش (Sprinkler Spreader) تتم تغذية الفحم بدوار أو جاروف إلى مختلف أجزاء المصبعة. المصبعه يمكن أن تكون مثبته أو متأرجحه. الإهتزاز يعمل على تكسير الزعب(Clinker) ويسمح بزيادة طول الدورة بدون نظافة يدويه. ولكن، إذا كان الفحم يحتوى على حبيبات دقيقة (Fines) عندئذ يتم نثرها فى تيار غاز المدخنه مسبباً إنبعاث الرماد الملوث للبيئة.

فى حالة التغذية بالمكبس (Ram Feed) أو وقاد التكويك المستخدم فى حرق فحم التكويك، فإنه يتم تغذية الفحم من القادوس إلى مقدمة المصبعه حيث يتم طرد المواد المتطايرة ويظل الكوك. المصبعة المتحركه عندئذ تجلب حركة أمامية نحو الكوك. وهى توفر كفاءة إحتراق عاليه ولكن التغيرات المفاجئة الكبيرة فى الطلب يصعب تحقيقها بسهولة مع ضرورة السحب العالى لتيار الهواء خلال النيران الكثيفه.

معظم المصبعات الصناعية المستخدمة فى إشعال الغلايات تعمل بمبدأ التغذية العلوية. سمك طبقة الوقود يتغير من 10 سم إلى 30 سم وينقسم الى أربع مناطق.

<u>الطبقة العليا</u>: هى طبقة التقطير أو طبقة الفحم الأخضر. <u>الطبقة التاليه</u>: هى طبقة الإختزال

. يليها منطقة الأكسدة ثم منطقة الرماد شكل رقم (20).



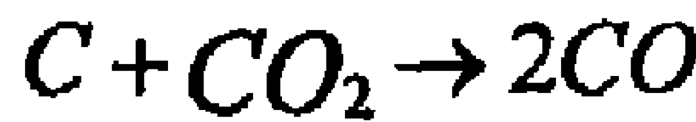
شكل (20) مقطع لطبقة الوقود بالتغذية العلوية

الهواء الأولى يدخل أسفل طبقة الوقود إلى أعلا خلال المصبعه فى منطقة الرماد حيث يتم تسخينه فى دورة تبريد الرماد. الأكسجين فى الهواء الأولى يتفاعل مع جزء من الكربون فى طبقة الكوك لتكوين ثانى أكسيد الكربون فى منطقة الأكسدة. عندما يكون هناك نقص فى الأكسجين من الغازات الساخنه الصاعدة خلال طبقة الوقود، فإن الكوك يختزل ثانى أكسيد الكربون ثانياً إلى أول أكسيد الكربون فى منطقة الإختزال. تفاعل الأكسدة هو :



$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

ولكونه منتجاً للحرارة فإنه ينشط التفاعل. ولكن التفاعل فى منطقة الإختزال هو:



$$C + CO_2 \rightarrow 2CO$$

ولكونه ماصاً للحرارة فإنه يعمل على خفض درجة حرارة المنتجات. فى منطقة التقطير، غازات الإحتراق المكونه من CO، CO_2، H_2 تعمل على تسخين الفحم. عندئذ تتفاعل المادة المتطايرة وأول أكسيد الكربون مع الأكسجين للهواء الثنائى الذى يدخل من أعلا لإكمال الإحتراق. مختلف مناطق التفاعل فى طبقة تغذيه الوقود العلوية موضحه فى الشكل رقم (20).

المصبعه المتحركه أو وقاد مصبعه السلسلة:

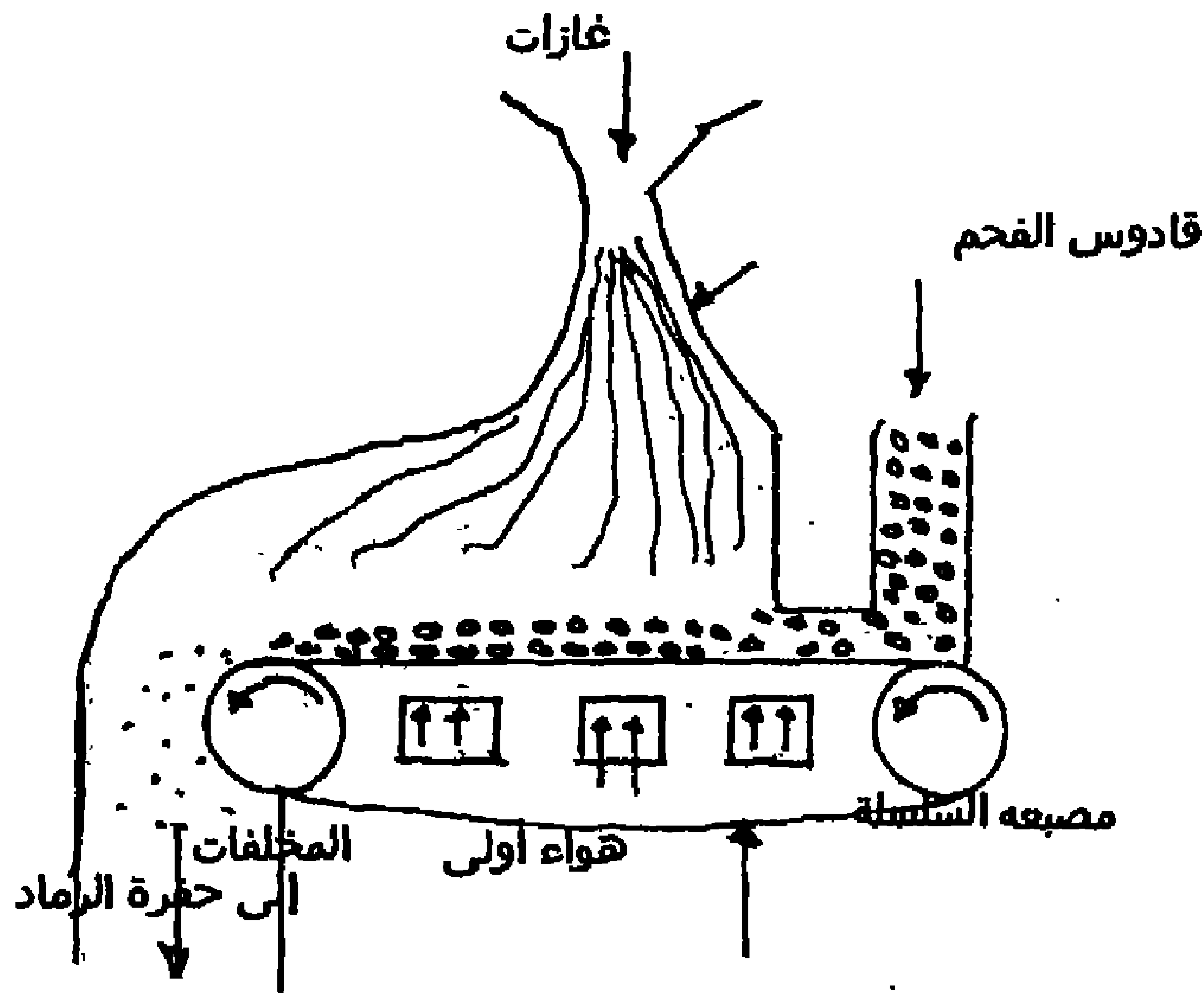
Traveling Grate or Chain Grate Stoker

هذا ناقل سلسلة بدون نهاية الذى خلاله يمر الهواء الأولى، والذى يحمل الوقود إلى الفرن والرماد من الفرن. معدل تغذية الفحم يتم إحكامها بسمك طبقة الوقود المسموح بها وبواسطة سرعة المصبعة. يمكنها حرق أى نوع من الفحم الصغير بكفاءة. ولكن، لا يمكنها إحراق الفحم ذو

المحتوى المنخفض من الرماد (أقل من 5٪) بسبب أهمية حماية المصبعه من الحرارة. لذلك لا يمكنها حرق دقائق الفحم (Slacks) المحتويه على نسبة عاليه من الحبيبات الدقيقة (أكبر من 30٪ يقل عن 1/8 بوصه) والذى يسبب الإنسداد لمرور الهواء فى المصبعه وفحم التكوك.

المصبعه تكون لها قضبان أكثر قرباً ومتشابكه. الفحم يدخل عند أحد النهايات ومع الوقت يصل إلى النهاية الاخرى، الإحتراق يكون كاملاً والرماد يسقط فى حفرة الرماد.

فى وقاد المصبعه المتحركه، يتم الحصول على أفضل النتائج بموازنه سحب الهواء أى يتم الإمداد بالهواء الأولى والثانئى تحت الضغط عند مقدمة الفرن والغازات العادمة تزال بفعل المص(Suction) عند الخلف. وقاد المصبعه المتحركة موضح بالشكل (21).



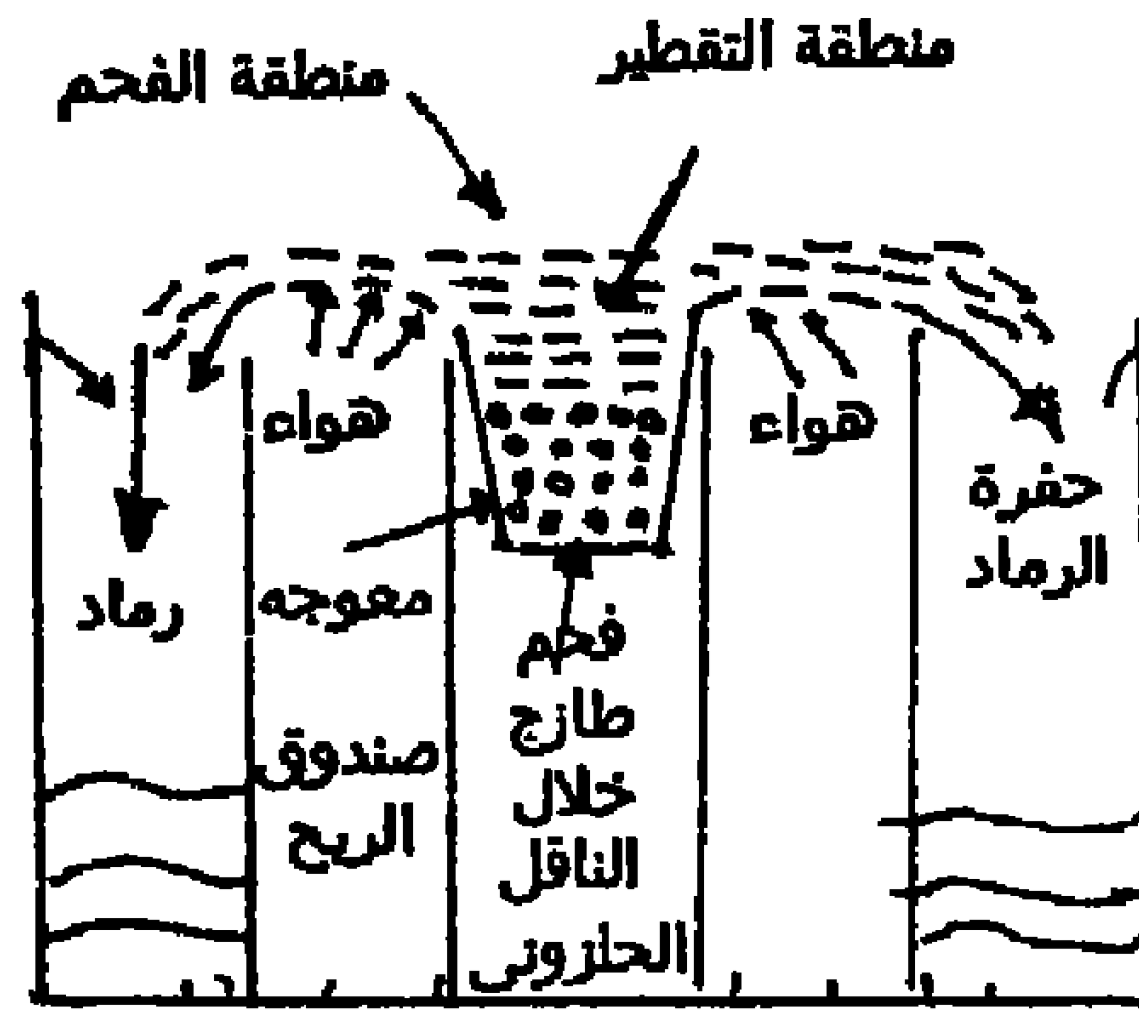
شكل (21): وقاد المصبعة المتحركة (السلسلة)

التغذية السفلية أو وقاد المعوجه:

Under Feed Or Retort Stoker

فى وقاد التغذية السفلية، يتم دفع الوقود الطازج نحو اللهب من أسفل بواسطة حلزون ويتحرك نحو الأجناب حيث يحترق. الرماد الذى يتراكم عند الأجناب يزال بتقليب كومة الرماد نحو منطقة الكوك الساخن مكوناً زغب الذى يمكن دفعه بواسطة ملقاط رفع (Tongs).

مميزات الوقاد هو أن المادة المتطايرة المقطرة من الفحم الطازج تمر خلال منطقة الأكسدة حيث ضمان إحتراقها الكامل. شكل (22).



شكل (22): وقاد التغذية السفلية بالمعوجة الواحدة

عادة تكون المصبعه مائلة بحيث يتحرك الوقود المحروق والرماد آلياً نحو الخارج مع دفع الوقود الطازج من أسفل بواسطة الناقل الحلزونى. هواء الإحتراق يتم إمداده خلال قصبة الفرن (ممر الهواء إلى الفرن – Tuyeres)أحياناً تستخدم المصبعات المتحركة كذلك فى سهولة الإزالة للرماد.

وقاد التغذية السفلية بالحجم الكبير يتم إقامته كوحدات معوجات متعددة. يعمل العديد من القواريس ومكابس الضغط على طول الجانب، لتوزيع الفحم فوق سطح المصبعه.

العوامل التى تحكم كفاءة مثل هذا الوقاد هى النسبة الصحيحة للهواء الأولى والثنائى، صافى نسبة الهواء/الوقود، حجم حبيبات الوقود، التوزيع المتجانس للفحم والهواء فوق المصبعه وحجم وشكل غرفة الإحتراق. بعض الوقود الغير محروق يمكن أن يمر خلال المصبعه بينما قد ينتج إنصهار للرماد أو تكوين الزغب فى التوزيع الغير متجانس للهواء. مثل هذه العوامل تقلل معدل التسخين أو كفاءة الوقاد.

مميزات الوقاد الميكانيكي مقارنة بالإشعال اليدوى:

- إستمرار العمل إذا كان الوقاد بالتنظيف الذاتى، لذلك لا فقد فى الكفاءة بسبب العمل المتقطع خلال الشحن والنظافة.
- معدل التغذية المتجانس وعملية الحرق التى تجعل من السهل التحكم الآلى.
- إرتفاع محتوى الغازات العادمة CO_2 والذى يترتب عليه زيادة الكفاءة.
- يمكن إستخدام مصبعات أضخم ذات إنتاجيه أعلا.
- إنخفاض تكلفة العمالة.

خواص الوقاد الميكانيكي الجيد: Good Mechanical Stoker

- يجب أن يحرق الوقود ذو نوعيه متعددة بكفاءة وبدون دخان .
- يجب أن يكون ذاتى التنظيف.

- تكاليف الصيانة يجب أن تكون منخفضة مع إتاحه الإستبدال السريع .
- إمكانية ملاحظة اللهب في الفرن.
- القدرة على سرعة الضبط لملاءمة مختلف الأحمال.
- القدرة على التحكم الآلى.

الفحم المطحون:(Coal Pulverized)

معدل الإحتراق للوقود الصلب منخفض بسبب صعوبة الإلتصاق بين الوقود والأكسجين. يمكن زيادة معدل الإحتراق بزيادة المعدل الذى يتم به دفع الهواء ولكن هذا يعنى إمداد هواء زائد بما ينتج عنه فقد فى الحرارة. كذلك يمكن زيادة معدل الإحتراق بطحن الفحم بحيث يمكن من إلتصاق كلا من الوقود والفحم. عموماً أنواع الفحم ذات المحتوى العالى من المواد المتطايرة هى المناسبة لعمل الوقود المطحون. المادة المتطايرة تنطلق بسرعة وتحترق وبذا تساعد فى حرق الكربون المثبت.

كلما كانت غرفة الحرق صغيرة، وإنخفاض المحتوى من المواد المتطايرة، كلما كان يجب أن يكون الطحن أكثر نعومة وأكثر تجانساً.

عموماً، يجب طحن الفحم بحيث 80٪ منه يمر خلال منخل (200 Mesh). الطحن التال يمكن أن يكون غير إقتصادى لزيادة طاقة الطحن المطلوبة.

مميزات الفحم المطحون:

- يمكن خلطه جيداً ومتجانساً مع الهواء الضرورى للإحتراق. لذلك، فإنه يمكن أن يحترق كاملاً.
- يمكن تداوله بحرص مثل الوقود السائل وممكن نقله خلال مواسير.
- يمكن التحكم بسهولة فى درجة حرارة الفرن بزيادة أو خفض معدل الإحتراق خلال محبس كما فى حالة الوقود الغاز/السائل.
- الجو داخل الفرن يمكن من الاستمرار بسهولة كمؤكسد أو كمختزل والذى ذو فائدة كبيرة فى حالة الأفران الميتاليرجيه.
- يمكن إستخدام نوعيات متعددة من الفحم.
- يمكن إستخدام الفحم ذو النوعية المتدنية شريطة أخذ إحتياطات خاصة فى حالة الفحم ذو المحتوى العالى من الرماد لتجنب الحمل فى الجو.

- يكتمل الحرق مع نسبة منخفضة من الهواء الزائد لذلك يمكن الحصول على كفاءة حرارية عاليه ودرجة حرارة لهب عاليه.
- أقصى كفاءة حرارية عالية ودرجة حرارة لهب عاليه.
- أقصى كفاءة ممكنه بسبب التنظيم لمعدل التغذية وإمداد الهواء بالتحكم الآلى.
- تكاليف العمالة منخفضة والصيانة غالباً خارج الفرن.

عيوب الفحم المطحون :

- التكلفة العالية نسبياً للتجفيف والطحن لحجم حبيبات دقيق جداً.
- الإستعداد لترسيب حيث على الحوائط الحرارية وبطانة الفرن.
- صرف الغبار الدقيق والحبيبات إلى الجو.
- ضرورة فضاء إحتراق ضخم لإكمال الإحتراق والإنتقال الحرارى ولتجنب ترسيب السناج فى المواسير والمداخن.
- تلوث المنتج فى الفرن بالرماد من الفحم.
- صعوبة حرق فحم الإنثراثيت.
- إحتكاك أجزاء غلايه الضغط بالرماد المتطاير المحتجز فى الغازات العادمة — زيادة تكاليف الصيانة للغلايه.
- إحتكاك ريش المروحة بالرماد المحتجز فى الغاز العادم.
- إرتفاع تكاليف الصيانة والتشغيل لوحدة الطحن.

نظم إشعال الوقود المطحون : Pulverized Fuel Firing Systems

الغرض من موقد الوقود المطحون هو الحصول على خلط جيد للوقود الهواء. يوجد العديد من نظم الإشعال للوقود المطحون وهى الإشعال الأفقى ، الإشعال الرأسى، الإشعال المماس (أو الركنى) والإشعال الحلزونى.

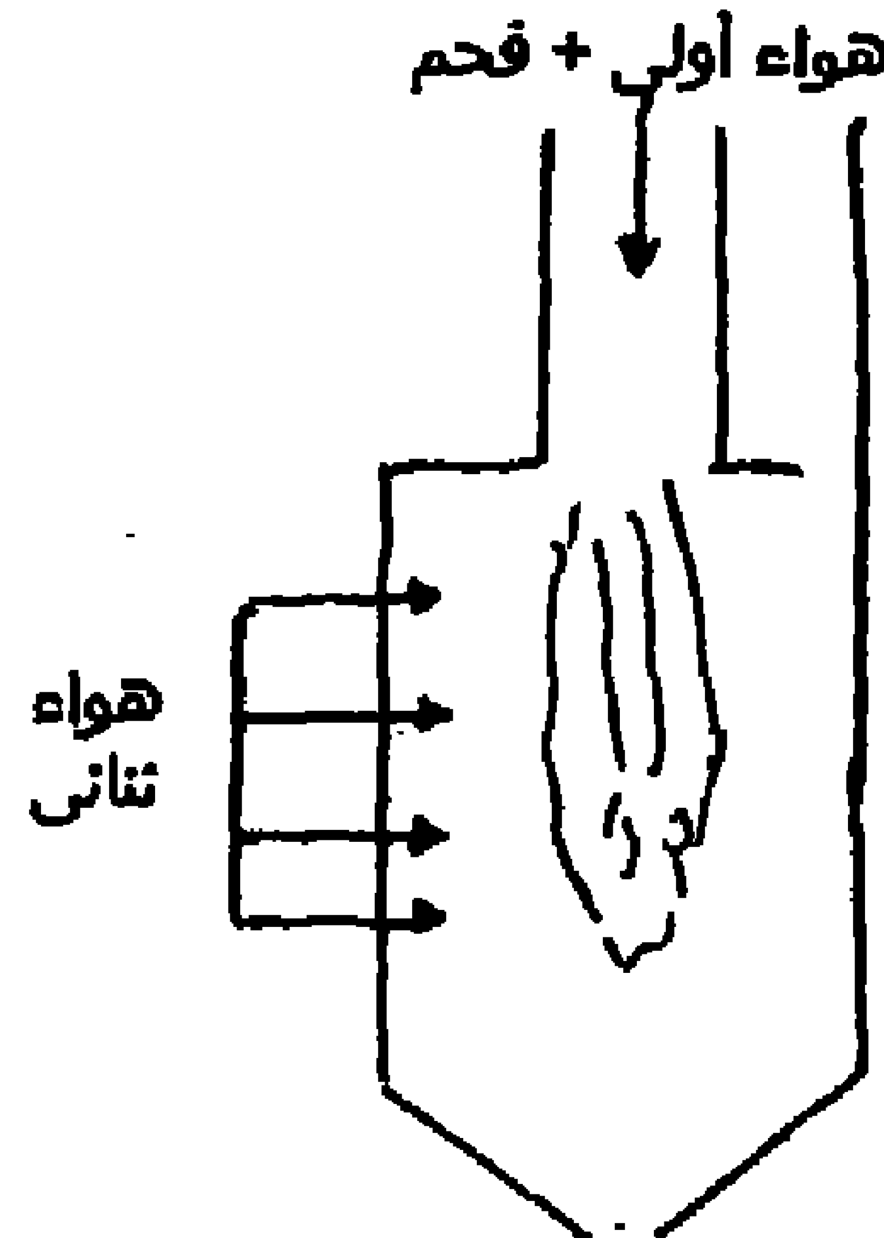
حجم حبيبات الفحم فى موقد الفحم المطحون يجب أن يمر 85 ٪ منه خلال منخل (Mesh 240) أى أقل من 0.063 مليميتر. تلك الحبيبات يتم دفعها إلى غرفة الإحتراق بالهواء الأولى الساخن حيث تحترق مثل نقط سائل الوقود. تحترق المادة المتاطيرة أولاً فى لهب تسرب كروى محيطاً بالجسم (Particle) ثم باقى الكوك يحدث له الحرق عند السطح. إرتفاع المواد المتطايرة وإنخفاض المحتوى من الرماد يعطى سرعة لهب أعلا (الأقصى تكون 15 متر / الثانية).

في حالة النقل لحبيبات الفحم بالهواء خلال ماسورة أفقية، فإن سرعة الهواء يجب أن تزيد عن 20 متر في الثانية.

مع دخول الفحم والهواء الفرن، فإن السرعة تهبط ويتم الحصول على لهب ثابت. اللهب سوف يستقر عند مسافة من 10 إلى30 سم من الفنيه.

حجم غرفة الإحتراق يتوقف على سرعة وحجم حبيبات الفحم. الوقت اللازم لحرق حبيبة الفحم يتوقف على حجم الحبيبة ودرجة حرارة الفرن. التقطير يحدث فى 0.005 ثانية. نصف الفحم يحترق عند حوالى 0.05 ثانية وخلال 0.1 إلى 0.3 ثانية 95٪ من الفحم يحترق. فى حالة عدم إكتمال الحرق، فإنه يتم حمل حبيبات الفحم بعيداً بواسطة الغازات العادمة. ولكن، أول أكسيد الكربون عادة لا يكون موجوداً فى مواقد الفحم المطحون.

أفران الإشعال الرأسى : Vertical Fired Furnaces



شكل (23): الإشعال الرأسى

هنا، يتم إشعال الفحم المطحون والهواء الأولى مباشرة إلى أسفل فى فضاء الإحتراق خلال مواقد طويلة ضيقه مستطيلة. يتم دخول الهواء الثانى خلال أجزاء صغيرة أسفل مقدمة جدارن الفرن. بدخول هواء ثنائى زائد يرفع جدار الفرن قرب الموقد، اللهب الناتج يمكن أن يكون قصيراً ومركزاً.

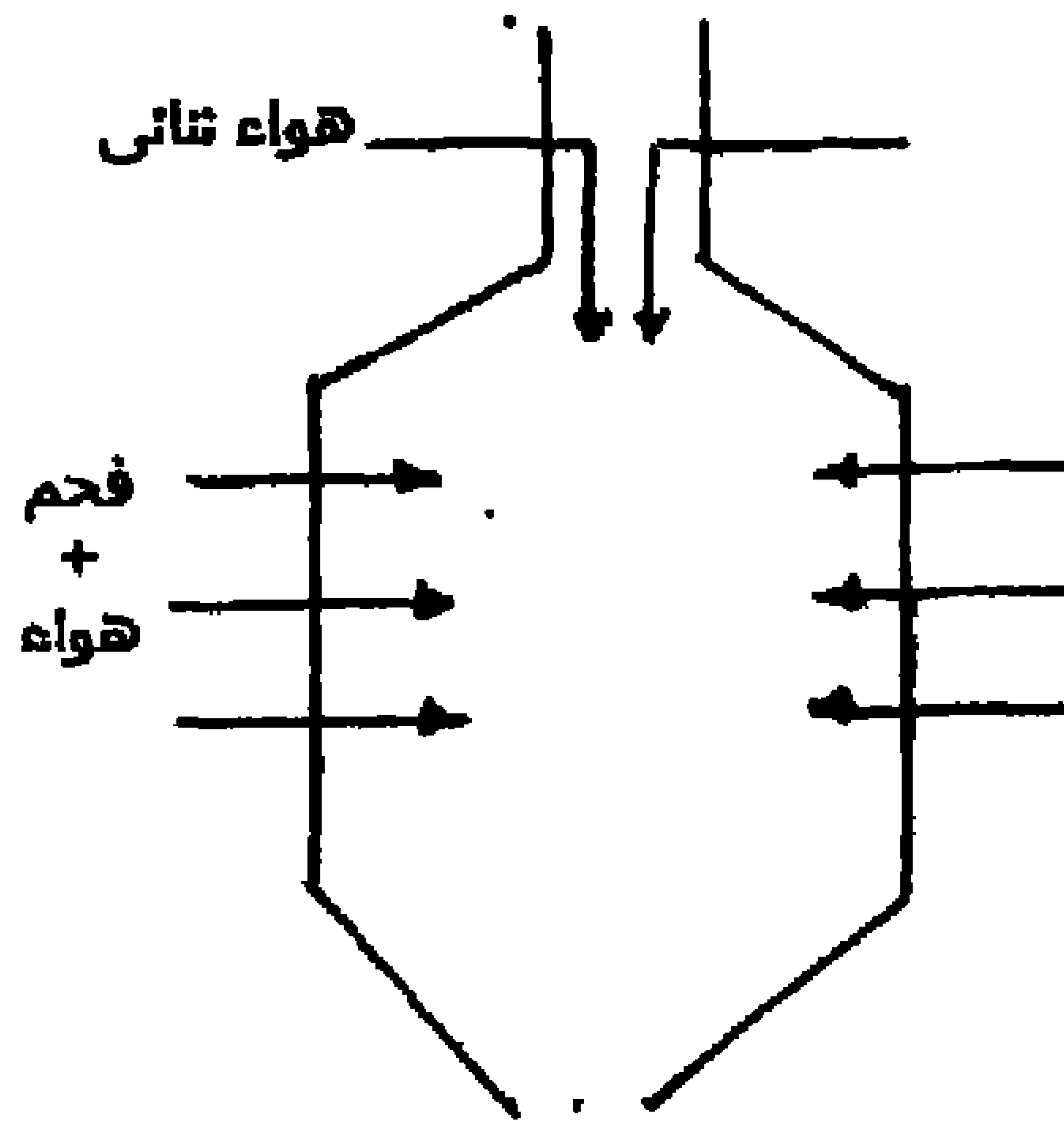
اللهب الطويل المتسرب يمكن أنتاجه بإدخال الهواء الثنائى متقدماً إلى أسفل لكل إرتفاع الفرن.

الإشعال الرأسى يوفر تجانس التوزيع لدرجة الحرارة خلال الفرن ويكون جيد خاصة فى الأفران العالي، الضيقه. الفحم ذو المحتوى المنخفض من المواد المتطايرة الذى يتطلب مسار طويل للهب لتوفير الوقت للحرق الكامل، يمكن إشعاله عمودياً أفضل عن أى طريقة أخرى رغم أن هذا التصميم يتساوى فى الجودة مع الفحم عالى المحتوى من المواد المتطايرة.

أفران الإشعال الأفقى : Horizontal Flame Furnaces

هنا يتم وضع المواقد أفقية أو إلى أعلا أو إلى أسفل قليلاً.

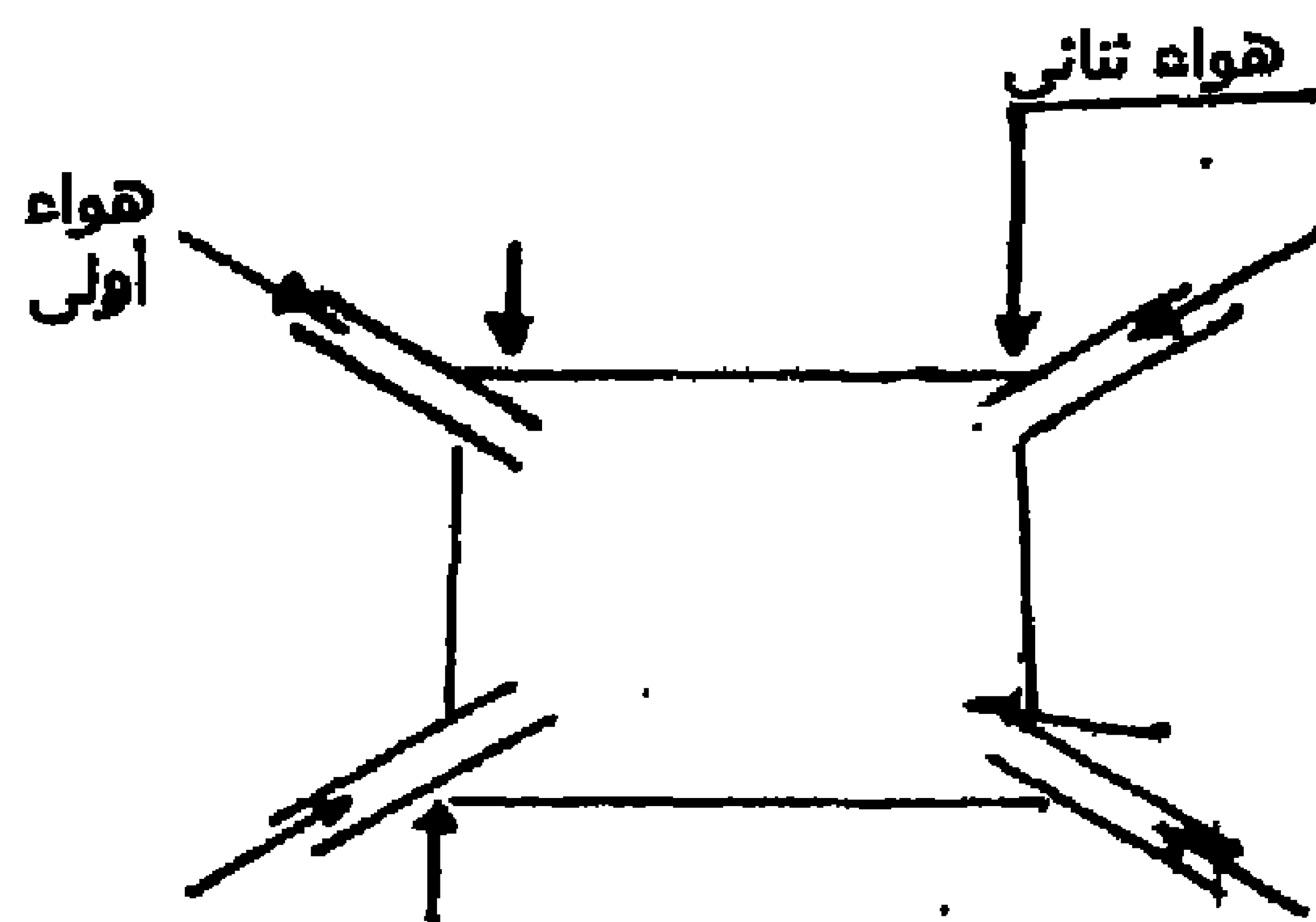
مع الضبط الجيد للموقد، يمكن الحصول على أما لهب طويل محترق أو لهب قصير مضطرب. اللهب الأخير ينتج معدل إنطلاق عالى للحرارة مع كفاءة إحتراق عاليه. أحياناً يتم وضع المواقد فى كل من مقدمة وخلف جدران الفرن لإعطاء لهب أفقى معاكس لخلق إضطراب عالى فى المنطقة حيث اللهب يصطدم بما يسمح بمعدلات إشعال عاليه جداً. اللهب المنتج أقصى إضطراب مع أدنى كمية من الخبث الراسب هو الأفضل المواقد. المواقد الأفقية لها أعلا طاقة حتى (0.5 طن فى الساعة)، لذلك يلزم مواقد أقل لمنشأ معين (شكل 24).



شكل (24): الإشعال الافقى

أفران الإشعال المماس Tangential Fired Furnaces

هنا، توضع المواقد فى الأركان الأربع للفرن وتستخدم غرفة الإحتراق لكل لإنتاج دوامة ... (شكل 25).

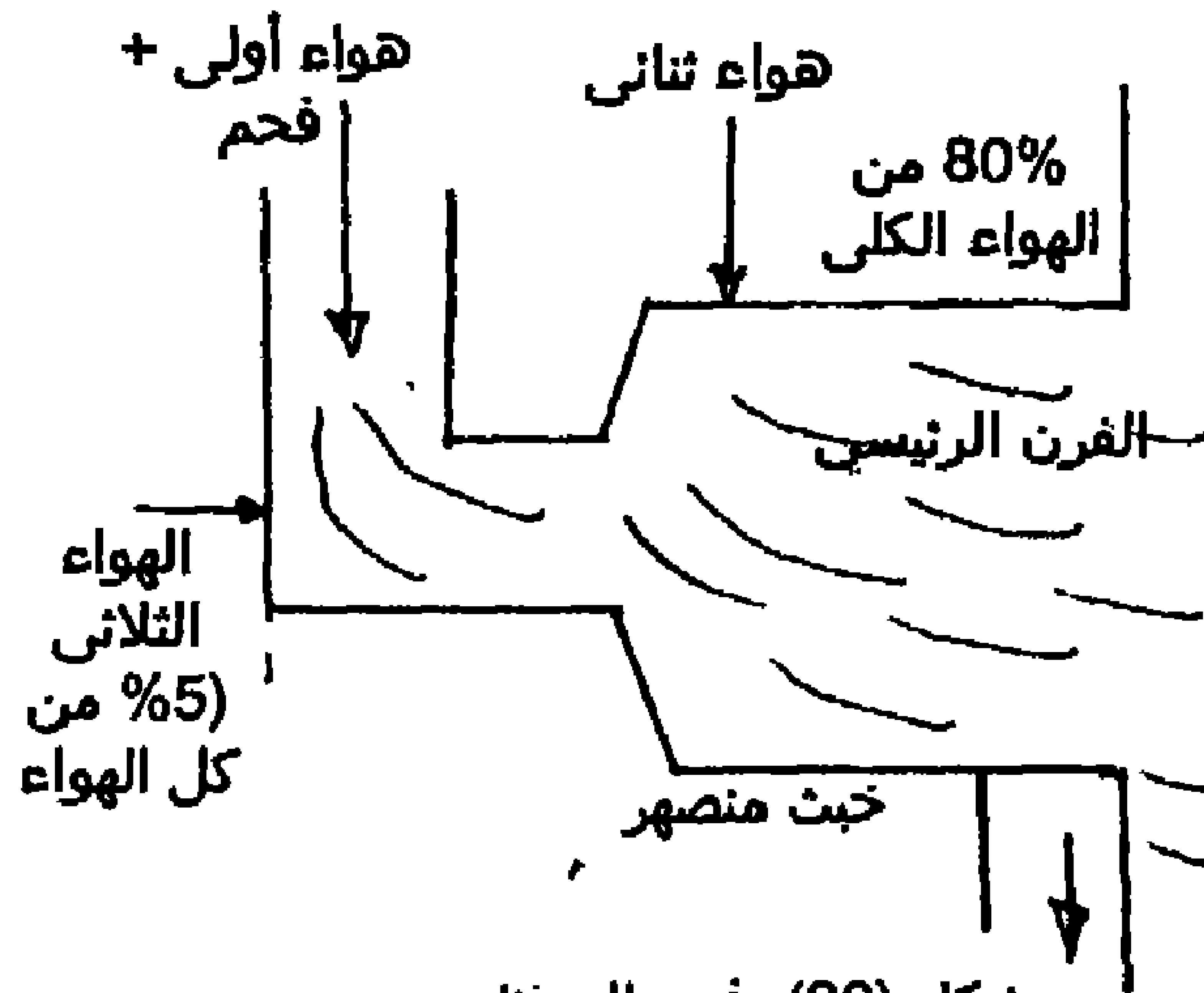


شكل (25) إشعال الفرن الركنى (المماس)

الإحتراق عند كل ركن يدعم بلهب من الذى قبله. تحدث حركه إضطراب كثيفة دوارة حيث اللهب يصطدم معززاً سرعة وإكتمال الإحتراق. نظراً لأن، كل الفرن يعمل كموقد لإنجاح الخلط والإحتراق فإن الهواء والوقود من كل موقد يحتاج إلى ضبطه كما فى حالة الموقد الأفقي. الإشعال الماس يسمح بمعدلات عالية جداً من الإنطلاق الحرارى ويعطى كفاءة إحتراق عاليه حتى مع القليل من الهواء الزائد .

أفران الإشعال الحلزونى : Cyclone Firing Furnaces

هنا يتم إشعال الهواء الأولى والفحم بالتماس إلى غرفة الإحتراق الإسطوانية. الفرن يكون مائلاً قليلاً ليسمح للرماد المنصهر للتدفق إلى أسفل. حبيبات الفحم الكبيرة قد تلتصق مع الرماد المنصهر حيث يتم حرقها بعد ذلك. يتم الحصول على كفاءة إحتراق عاليه بهواء زائد مقداره 10-15٪. هذا الفرن يفصل معظم الرماد من الغازات العادمة وحوالى 10٪ فقط منه يحمل خلالها. فى الموقد الحلزونى الفحم المطحون إلى أقل من 6 مليميتر(بذا يتم تجنب تكاليف الطحن العالية خاصة للفحم متدنى الرتبه والذى عادة يكون صلباً) يتم حرقه تحت ظروف الإضطراب الكثيف فى غرفة تبريد مائية صغيرة نسبياً. هنا يتم إستخلاص 80-80 ٪ من الفحم فى الحالة المنصهرة وتكون لذلك قابله للتطبيق للفحم له لزوج خبث الرماد 250 بويز عند حوالى 1300°م.



شكل (26): فرن السيكلون
ملاحظة: الهواء الثانى 80% من كل الهواء

كذلك تنقسم أفران الوقود المطحون طبقاً لطريقة إزالة الرماد :

- نوع الفرن بالقاع الجاف.
- فرن صنبور الخبث Slag Tap

- فرن حلزونى ... إلخ

فى الأول: يتم تبريد جسيمات الرماد بتبادل الحرارة لإشعاعية مع الحوائط، جسيمات صغيرة (تسمى الرماد الطائش) تمر إلى الأمام مع الغازات (80-85٪من الرماد).
الغاز العادم يمكن أن يتم تدويره فى نظام محول الحرارة لتبريد إضافى للرماد.

فى الثاني: ينصهر الرماد فى الفرن ويتدفق إلى أسفل فى حوض ماء حيث يتم تحبيبه (40-50 ٪ رماد). يفضل فى هذه الحالة الرماد ذو نقطة الإنصهار المنخفضة.

مواقد الفحم المطحون : Pulverized Coal Burners

أنواع المواقد المستخدمة فى إشعال الفحم المطحون هى كالآتى:

نوع الفحم المستخدم	نوع الموقد
عالى المواد المتطايرة	قصير اللهب مع إضطراب بالحث الذاتى
متوسط المواد المتطايرة	قصير اللهب مع إضطراب بالحث الخارجى
منخفض المواد المتطايرة	لهب طويل أو النوع (U)

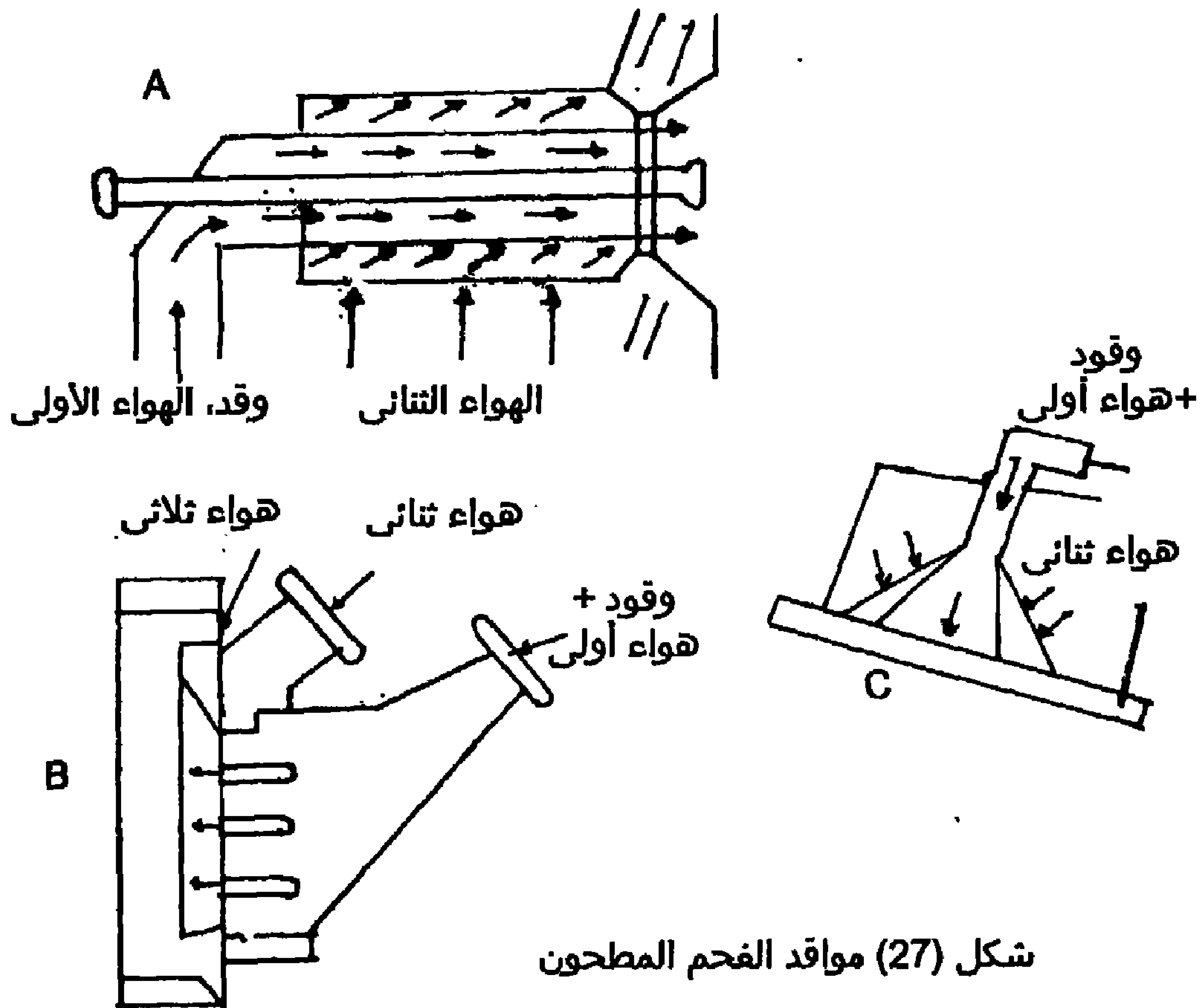
مبدأ الموقد قصير اللهب هو ان الحركة النسبية يتم حثها (Induced) ما بين حبيبات الفحم المحمولة فى تدفق الهواء الأولى والهواء الثانئى. كلا التدفقين يمكن أعطاءهم حركة دورانية بحيث يتم دفع حبيبات الفحم إلى الخارج وإنتشارها فى الإمداد الطازج بالأكسجين. هذا الإلتصاق السريع المستمر للفحم مع الهواء يتم تحقيقه فى واحد من المواقد. باستخدام ذبذبات مناسبة له وفى الآخر (المتعدد البثق) بتقسيم مساحة الموقد إلى عدد من التدفقات المتجاورة.

مواقد اللهب القصير عادة يتم تنظيمها على جدار واحد للفرن بحيث أن إنطلاق اللهب يملأ الغرفة ولكن لا يصطدم على الحوائط بتبريد الماء.

المواقد متوسطة اللهب تستخدم فى كثير من غلايات الوقود المطحون حيث الفحم يكون من نوع المحتوى المتوسط من المواد المتطايرة. الفنيات (Nozzles) التى تقوم بإمداد خليط الفحم – الهواء تكون موضوعه مركزياً خلال فتحات الهواء الثانئى المستطيلة بحيث يتم الحصول على نافورة طويلة حلقية محاطة بالهواء الثانئى الساخن. يتم الحصول على الإضطراب الضرورى بتنظيم المواقد بحيث يتم إحداث دوامة كثيفه. المواقد يمكن تنظيمها فى الحوائط المعاكسه أو مماسة لدائرة إفتراضية متصورة مركزها فى وسط فضاء الإحتراق. حوائط الفرن عادة تتكون من

انابيب عاريه للتبريد بالمياه لإمتصاص الحرارة بالإشعاع وكذلك بالحمل الحرارى. يكون عادة من الضرورى إستخدام مثل هذا النظام على مطحنه لضمان تجانس التوزيع.

موقد اللهب الطويل كان أول نموذج يستخدم وكان ينظم للإشعال السفلى نحو غرفة الإحتراق. الهواء الثنائى، والهواء الثلاثى فى حالة طلبه، يتم إدخاله خلال حائط الفرن بزاوية قائمة نحو اللهب، وتنظيم الفتحات لإعطاء تحكم جيد لشكل اللهب ولتحقيق الإحتراق الكامل. اللهب فى شكل (U) أعطى إسم لهب (U) لتلك المواقد. وهى أكثر مناسبة للفحم ذو المحتوى المنخفض من المواد المتطايرة حيث أن الإحتراق الكامل يمكن تحقيقه فى فترة طويله، أو مسار طويل، ولكن سرعة التدفق الخارج بطيئة وتتضمن عيوب فضاء إحتراق ضخم. وهى رغم هذا مناسبة للفرن الذى فيه عدد من الوحدات يتم إشعالها من نظام الصندوق والمغذى (Bin and Feeder System).



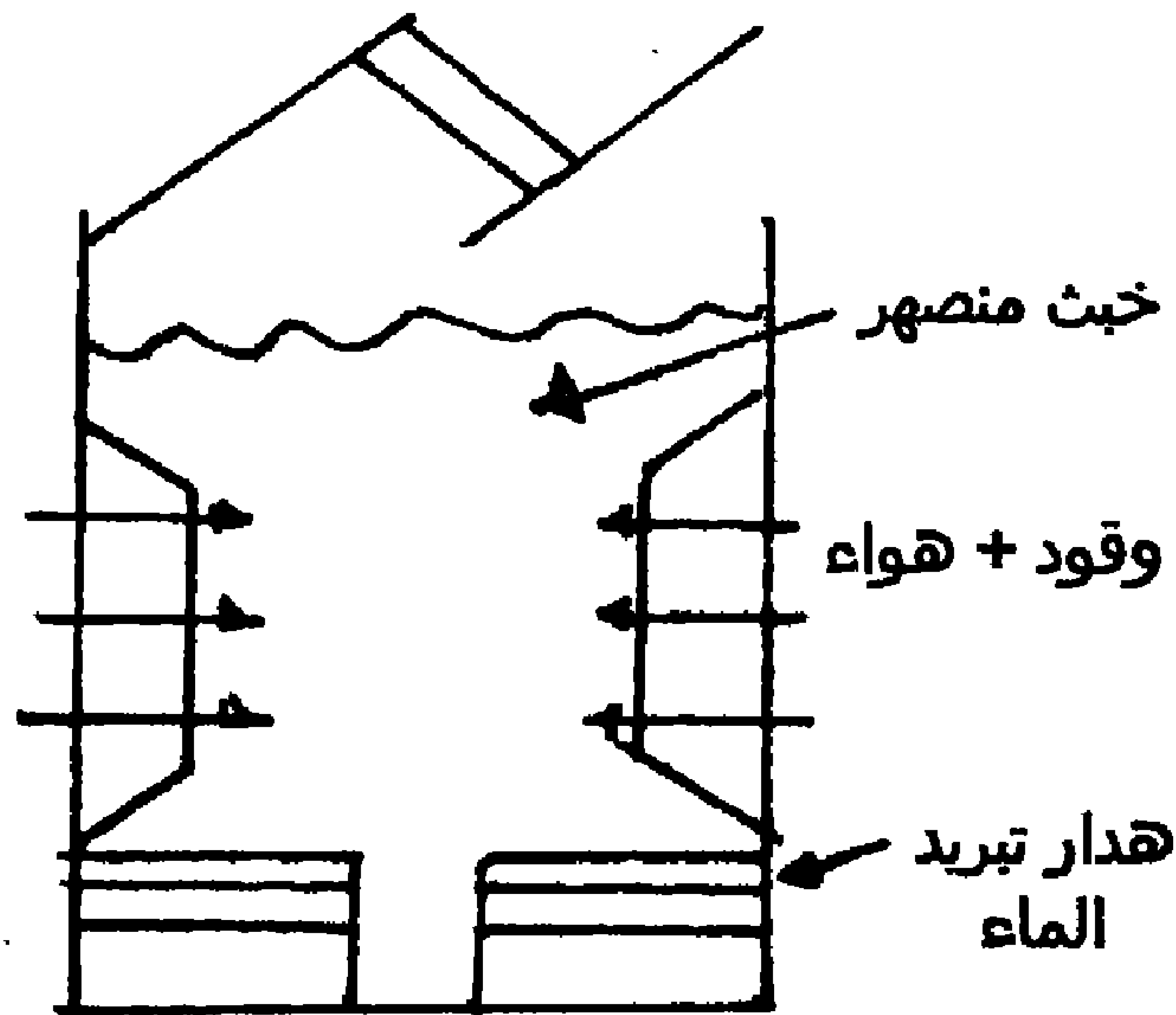
شكل (27) مواقد الفحم المطحون

A. موقد أسطوانى B . موقد متعدد النافورات C. موقد اللهب (U)

أفران القاع الرطب : Wet Bottom Furnaces

مشكلة حرق الفحم ذو امحتوى العالى من الرماد أو الفحم البني فى أفران الغلايه هو إزالة الرماد. لذلك فإن الأفران يتم تصميمها لإزالة الرماد فى شكل سائل. يتم عمل درجة حرارة اللهب عاليه الإرتفاع لإمكان إنصهار الرماد عند الجزء السفلى والكتلة المنصهرة تسيل خلال جدار الفرن وتزال. هذا النوع من الأفران يسمى أفران القاع الرطب. الحوائط تكون مزودة بأنابيب تسخين على كل الأجناب والماء بداخلها يتم تجهيزه. الخبث المنصهر نفسه هو عازل حرارى جيد والذى يحمى بطانة حائط الفرن. السمك لا يزيد عن قيمة معينة.

النقاط القادمة من أول وقت تتجمد وتكون طبقة ذات سمك كبير. الخبث لا يتجمد بعد ذلك. درجة حرارة السطح تصل إلى نقطة إنصهار الخبث حيث يكون عازلاً جيداً. الطبقة تكون عاليه اللزوجه ولا تتحرك بسرعة عاليه. المعدل هو حوالى 0.1 سم/ث، والذى بسبب تكوين طبقة سائله من الخبث شكل رقم (28).



شكل (28): فرن القاع الرطب

هذا النوع من الأفران يستخدم فى الغلايات حيث الوقود يكون من النوعية المتدنية من اللجنيت فقط، الذى به 40 -45٪ رطوبة وما يزيد عن 50٪ من الرماد على أساس الجفاف.

3

الفصل الثالث

المواقد لإحتراق الوقود السائل والغازى

Burners For Liquid and Gaseous Fuels Combustion

المتطلبات العامة لنظام المواقد /الإحتراق:

لتحقيق الإحتراق السلس الكفؤ، فإن الوقود يجب أن يكون حر الإشعال مع دخوله منطقة الإشتعال حتى مع عدم ثبات وتغير الحمل خلال مجال معين. الإشعاع من اللهب وسطح الحرارى الساخن، والحمل الحرارى من الغازات الساخنه يجب أن يكون مناسباً لإشعال الوقود الطازج. مكونات خليط الوقود – الهواء الأولى يجب أن يكون خلال حدود القابلية للإشتعال. للحصول على المعدل المطلوب لإنطلاق الحرارة، يكون من الضرورى إستمرار ثبات اللهب خلال عملية الإحتراق. المواقد يجب عدم إستخدامها دون أو أعلا من مجال طاقته الإلزامى. اللهب يجب عدم مجيئه ملتصقاً مع سطح بارد جداً بالهواء. كل العوامل المسببه لإنطفاء اللهب أو ارتداد اللهب يتم تجنبها. بعض حاملات اللهب تعزز ثبات اللهب. حتى فى حالة تقدم الإحتراق عند درجة الحرارة العاليه مع معدل محدود لذا فإنه يتم توفير فضاء الإحتراق المناسب مع الغازات العادمة والتى سوف كذلك تزيد من مشكلة الدخان. الدخان البني يعود إلى أبخرة المحروقات التى لم تحترق. الدخان الأسود يعود إلى أسود الكربون الناتج بتبريد اللهب عند إصطدامه بسطح بارد. شكل اللهب يجب أن يقابل إلى الشكل الهندسى للفرن والعكس صحيح. كمية الإمداد بالهواء تكون هامة للحصول على الإحتراق المناسب. باستثناء بعض نظم الخلط السابق، فإن الهواء الزائد يكون دائماً مطلوباً لإكتمال الإحتراق ولكن، إذا كان المطلوب هو جو إختزال، فإنه يتم تجنب الهواء الزائد حتى أن كمية الهواء يجب أن تكون عند الأدنى منسجمه وغير متناقضة مع متطلبات النظام المعين. طريقة الإمداد بالهواء يجب أن تكون بحيث أنه يوجد إلتصاق جيد للأكسجين مع المواد القابلة للإحتراق. يتم ذلك بخلق إضطراب شديد فى فضاء الحرق. يجب المحافظة على إستمرار درجة الحرارة الكافية لغازات الإحتراق عند كل أجزاء غرفة الإحتراق. هذا هام بالنسبة للإشتعال السلسل، ثبات الإحتراق ونظام خالى من الدخان كفؤ. نظرياً الحرق الكافى جداً هو ذلك الذى يؤدى إلى أقصى درجة حرارة ممكنة. ولكن، عملياً يتم المحافظة على درجة حرارة الفرن دون الحد الأقصى فى كثير من الحالات حيث عوامل تشغيل أخرى تكون هامة.

إختيار الموقد : Selection of Burner

يتوقف إختيار الموقد لعملية معينة على الخواص الخمس الآتية:

- شكل اللهب.

- حجم الإحتراق.
- الإستقرار والتوزان.
- الدفع Drive.
- نسبة التخفيف Turn Down Ratio.

تلك الصفات الخمس تتوقف أساساً على تصميم الموقد وعوامل أخرى مثل زيادة ضغط الهواء الأولى، زيادة/خفض ضغط الوقود ... إلخ . ولها تأثير قليل على تلك الخواص.

شكل اللهب : Flame Shape

تصميم الموقد، الذى يعين السرعات النسبية لتدفقات الوقود والهواء، له أقصى تأثير على طول اللهب وشكله. الخلط الجيد، الناتج بدرجة عاليه من الإضطراب والسرعة العاليه، ينتج لهب قصير وكثيف . على الجانب الآخر الخلط المعوق (Delayed Mixing) والسرعات المنخفضة تنتج لهب طويل كسول.

حجم الإحتراق : Combustion Volume

الفضاء الذى يشغله الهواء والمنتجات الوسيطة للإحتراق يتغير كثيراً طبقاً لتصميم الموقد، الضغوط والسرعات لتدفقات السائل، الوقود والإستخدام. مواقد الغاز يمكن تصميمها ليكون لها إطلاق حرارى مرتفع حتى 110×10^6 كيلو كالورى / السعة × متر مربع من حجم الإحتراق. مواقد الزيت الخفيف تعمل عادة بمعدل 270000 كيلو كالورى / الساعة × متر مربع، ومواقد الزيت الخفيف عند 220000 كيلو كالورى/الساعة×المتر المربع.

الإستقرار : Stability

مع التطوير فى تصميم الموقد، فإن المواقد الحالية أكثر إستقراراً. المواقد المتاحه الآن والتى ليست فقط مستقرة بالنسبة لحراريات تغطيه الحوائط والأرضيه، (Tile Stable) ولكن مستقرة كذلك فى الغرف الباردة والمضغوطة.

الدفع : Drive

الدفع المتعلق بسرعة وإندفاع تيار البثق للغازات الساخنه التى تنبثق من الموقد. المواقد الحديثة عاليه السرعة يمكنها دفع الغازات الساخنه إلى حمل المحرقه المفكك بسرعات أعلا عن ما كان ممكناً مع معظم مواقد الهواء الزائد القديمة.

نسبة التخفيف:

نسبة التخفيف للموقد هى معدلات الطاقة التى خلالها سوف يعمل الموقد بكفاءة هذه هى نسبة أقصي إلى أدنى معدلات الطاقة الحرارية التى بها سوف يعمل الموقد بكفاءة. أقصى معدل للطاقة محدود بظاهرة تسمى إنطفاء اللهب (The Flame Blow Off) – ينتج هذا عندما تزيد سرعة الخليط عن سرعة اللهب. أدنى معدل للطاقة يكون محدوداً بظاهرة تعرف بارتداد اللهب (Flash Back).

أى نظام حرق يجب أن يكون لديه الآتى:

- مصدر للهواء.
- مصدر للوقود.
- موقد.
- محابس وتجهيزات تنسيب.

أغراض نظام حرق الوقود هى :

- وضع اللهب عند مساحات مفيدة فى إطلاق الحرارة.
- بداية وتسهيل وإستمرار الإشتعال.
- خلط الوقود والهواء.
- تبخير الوقود الصلب والسائل.
- تنسيب الوقود بالهواء.
- الإمداد بالوقود والهواء عند المعدلات والضغوط المناسبة يسهل كل الآلات الخمس السابقة بالأمان اللازن للعملية.

المهام الأولي للموقد هى إستقرار اللهب وإستمرار صيانة الإشعال بدون مرشد أو دليل.

مكونات الموقد :

لب أى موقد هو الانف (The Nose) والذى يمكن أن يتكون من فنيه أو ثقب واحد أو العديد منهم. الانف يجب أن يكون تام التبريد لحمايته من التدمير الحرارى بالإشعاع من اللهب والفرن ولمنع إرتداد اللهب فى حالة المواقد سابقة الخلط. حديد الزهر المقاوم للحرارة ذو مساحة المقطع الكافيه يضمن التبريد الكافى بالتوصيل والحمل الحرارى فى كثير من الحالات. السبائك الأخرى المقاومة للحرارة، الحراريات أو التبريد الصناعى هى ومسائل تبادليه، حراريات الموقد

هى كتلة حرارية ذات فتحه قمعيه أو أسطوانية خلال مركزها. بالإضافة إلى العمل كعازل للفصل بين الفرن الساخن وأجزاء الموقد الباردة، فإن العزل الحرارى (Tile) يشع حرارة نحو الوقود/الهواء القادم، لذلك يساعد فى استمرار اللهب. العناصر الرئيسية الآخرى للموقد هى:

1. الجسم (Body) : والذى يمكن أن يشمل الهواء لوصله الخلط، ويسمى الدوامه والأنف.
2. لوح الحمل (Mounting Blate): الذى يمسك الجسم الحرارى، الدليل (Pilot) وتجهيزه ضبط اللهب وغلاف الفرن فى إستقامة مناسبة.
3. وصلة الغاز (Gas Connection): أنبوب الغاز وفنيه الغاز .
4. المرزاز (Atomizer): الذى يشمل الزيت ووصلة مجال الترزيز، الأنابيب، الفني (Nozzle).

الموقد الدليل (Pilot): هو موقد صغير يستخدم لإشعال الموقد الرئيسي الأكبر. الموقد الدليل هو عموماً يتكون من ثلاث أنواع وهى:

- الدليل المضطرب، الدليل المتقطع، الدليل المستمر.

الدليل المضطرب:يلتهب أثناء فترة تأسيس اللهب أو فترة محاولة الإشعال ويتوقف (يضطرب) عند نهاية تلك الفترة.

الدليل المتقطع: يلتهب أثناء إنطفاء اللهب وكل فترة حيث الموقد سكون مشتعلاً، ويتوقف مع الموقد الرئيسي.

الدليل المستمر: يلتهب خلال كل الفترة حيث يكون الفرن فى الخدمة سواء الموقد الرئيسي مشتعل أم لا.

الدليل المضطرب: مفضل بمقارنته بالدليل المستمر أو المتقطع.

كل موقد يجب أن يكون له فتحة ملاحظة لأغراض الأمان، يحيث أن اللهب الرئيسي ، لهب الدليل وقضيب اللهب يمكن رؤيتهم بواسطة العمال.

تصميم الموقد يجب أن يكون منتجاً شكل لهب محدد مطلوب لتصميم فرن معين ونظام الإنتقال الحرارى.

فى الأفران الصناعية، تقنيات الإنتقال الحرارى المستخدمة هى أساساً الإشعاع والحمل الحرارى، التوصيل الحرارى عادة يكون عملية ثانوية بعد خطوة الإشعاع والحمل الحرارى. شكل اللهب والسرعة لهم الأهمية الأولى فى الإنتقال الحرارى من عمليات الإحتراق.

تقنيه الإنتقال الحرارى من عملية الإحتراق إلى الحمل تتعلق بإطار الإنتقال الحرارى الذى يتأثر بشكل اللهب، البريق والسرعة. وهو مسألة شكل أو هندسة.

مواقد الوقود السائل :

الزيت يمكن أن يحترق بطريقتين:

1. يتم التبخير قبل الإشتعال بحيث يحترق مثل الغاز (موقد التبخير).
2. التكسير إلى نقاط صغيرة التى يتم حقنها فى الهواء الساخن بحيث أن تتبخر أثناء الحرق (موقد الترزين).

الطريقة الأولى : عموماً غير مستخدمة على المستوى الصناعى. فى الطريقة الثانية لإحتراق الوقود السائل، يتم تسخين الزيت إلى لزوجة منخفضة مناسبة ثم ترزيزه بالآتى:

1. ميكانيكى بواسطة قرص أو فنجان أو دوامة والذى يعطى رش الزيت متسع وبذا مساحة لهب متسعه ولكن حجم نقطة متجانسه (50 ميكرون).
2. بالبثق من فتحه ضيقه بالضغط العالى والذى يعطى رش مخروطى .
3. الغالب عادة هو الحجز فى تيار من الهواء أو البخار والذى يعطى بثق ضيق ولهب طويل وينتج معظم حجم النقط المختلفة.

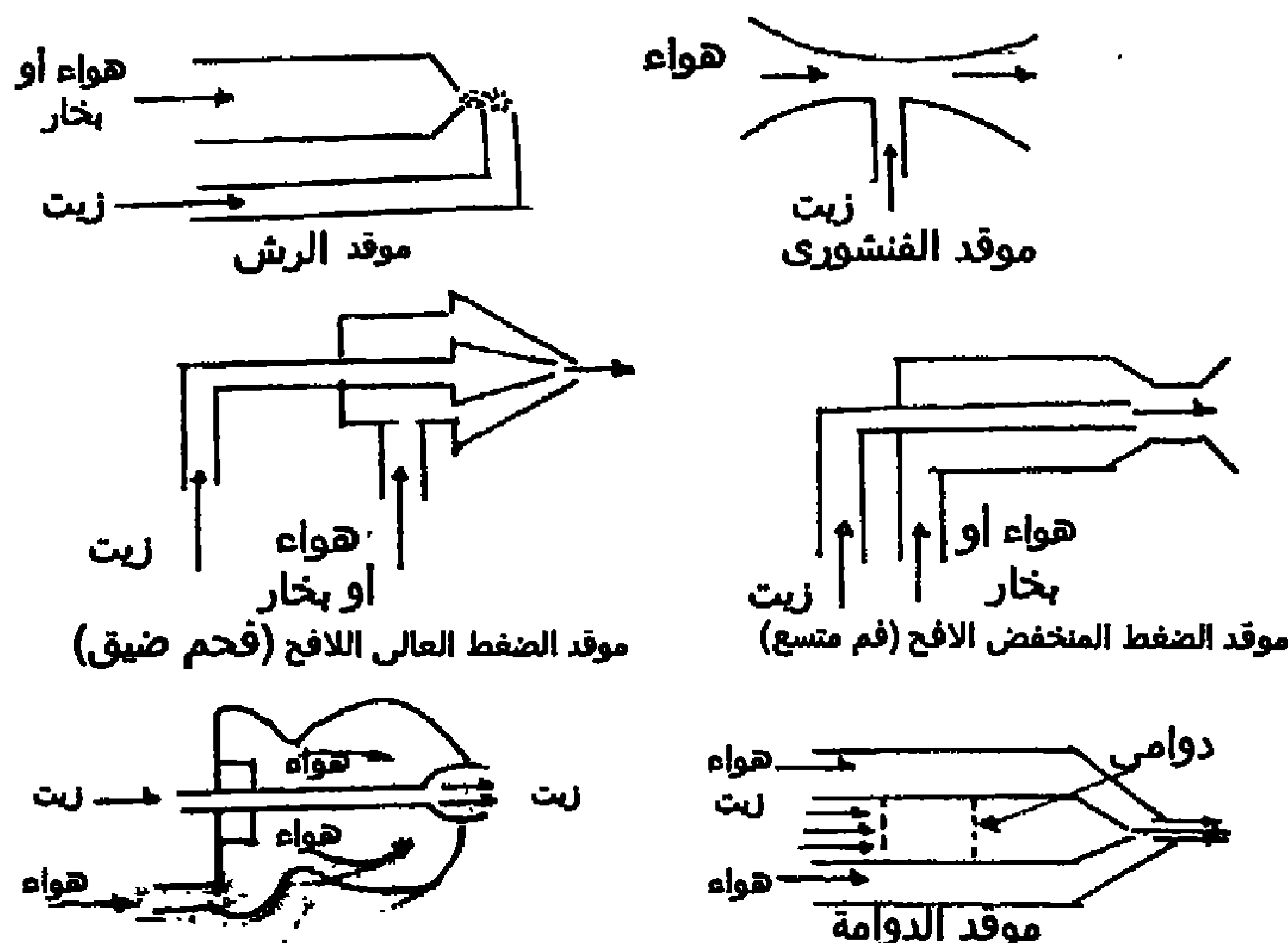
رغم أن الترزيز بالهواء يعطى أفضل درجة حرارة لهب مقارنة بالبخار إلا أن الترزيز بالبخار مازال هو المفضل لوقود قار الفحم عالى اللزوجة ومخلفات زيوت الوقود ذلك لأن البخار هو مصدر للحرارة التى تعمل على خفض اللزوجة للزيوت عالية اللزوجة. هذا بجانب أن البخار أرخص فى الإنتاج مقارنة بالضغط العالى للهواء.

فى معظم التطبيقات الهواء المضغوط هو المائع المرزز. الميزه الرئيسية للترزيز بواسطة الموائع (Fluids) مقارنة بالترزيز الميكانيكي هو زيادة إكمال إحكام الخرج (Out put) (نسبة الإنخفاض = 10 : 1) وشكل اللهب . الإعتبار السلبي الغالب هو تكلفة الإمداد بالمائع تحت الضغط.

عند بثق الزيت في الفرن الساخن بواسطة الهواء السابق تسخينه فإن النقاط تتبخر فى الحال ومعظم الإحتراق يحدث كتفاعل مجال البخار. شكل سطح الإحتراق يحدد المعدل الذى عنده سوف يتداخل كلا من بثق الزيت والهواء ويتفاعل وبالتالى درجة الحرارة التى تم الوصول إليها.

المثالى ، الموقد يجب أن يكون متغيراً لإعطاء لهب ساخن قصير أو لهب بارد طويل طبقاً للمطلوب. التأثير يمكن الحصول عليه بإحكام محتوى الأكسجين للهواء، وإثراء الأكسجين للهواء معطياً لهب أكثر سخونة وقصير.

بعض مواقد الترزيز للزيت النموذجى موضحه بالشكل (29).



شكل (29) بعض مواقد الترزيز للزيت

فى بعض الأفران (مثل غلايات الإشعال بالزيت للإستخدام البحرى) يتم خلط الزيت والهواء فى غرفة إحتراق خاصة ما بين الموقد وغرفه الإحتراق نفسها. يتم دفع الوقود والهواء فى قمة محكمه (Tight Vertex) فى هذه الخانه (القسم) الصغيرة. يتم الحث لدرجة عاليه من الإضطراب وفقد القليل جداً من الحرارة من الغازات قبل تدفقها إلى الخارج، كاملة الإحتراق وعند أقصى درجة حرارة نحو الفرن.

مواقد التبخير تستخدم لوحدات التسخين ذات الفحم الصغير مثل سخانات الهواء المحمولة، الغلايات الصغيرة، مواقد الطهى ... إلخ مواقد الترزيز تستخدم أساساً فى التسخين الصناعى.

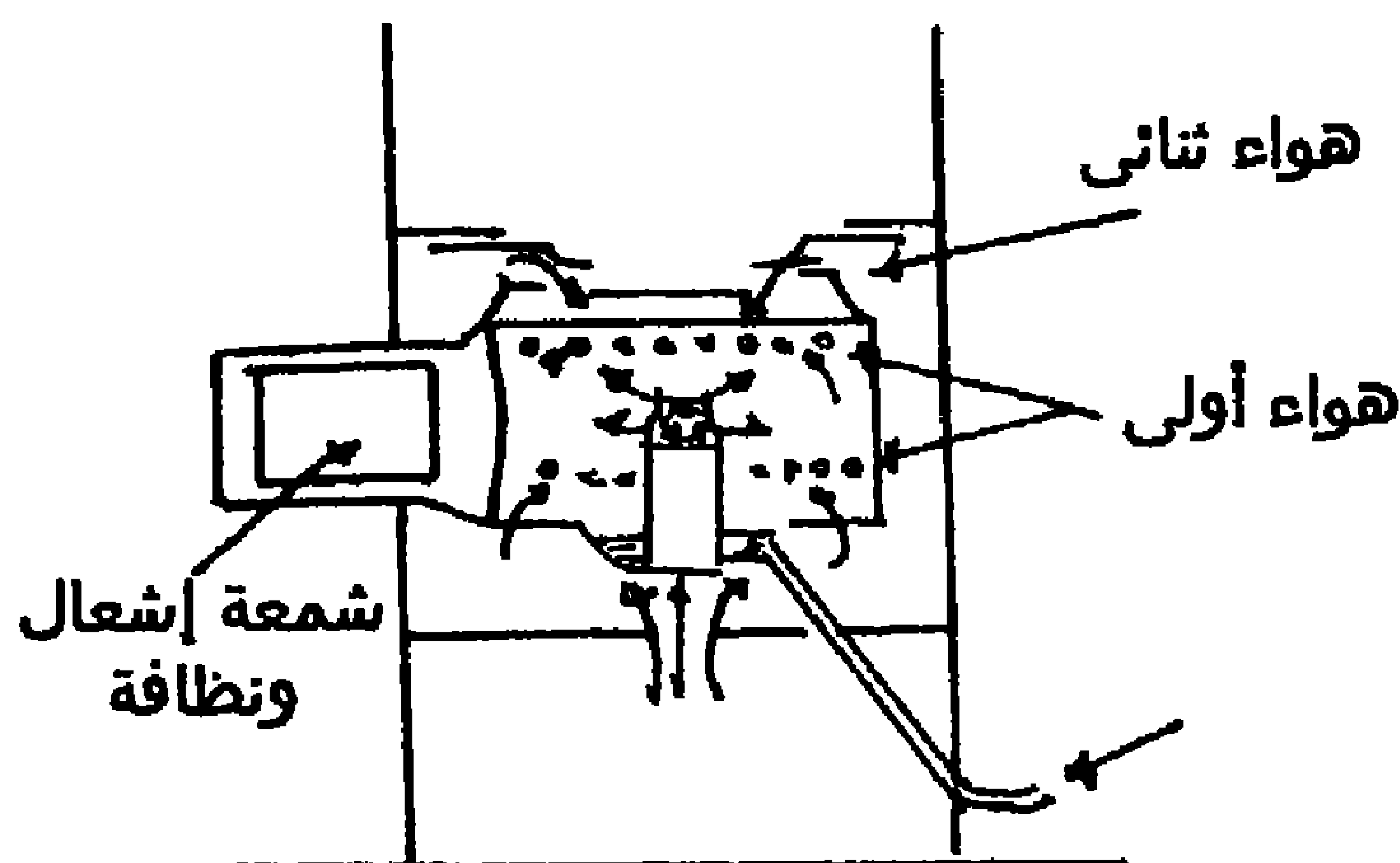
مواقد تبخير الزيت : (Vaporizing Oil Burners)

فى مواقد تبخير الزيت (مناسب للنافقا حتى زيت الوقود الخفيف) مثل المصابيح، مواقد الجازولين المحمولة حيث يمر الوقود المتطاير عند ضغط منخفض خلال أنبوب مجاور للهب،

حيث يحدث التبخر. تيار البخار يخرج من الفتحة عند سرعة عاليه ويستعلق (Entrains) الهواء الأولى. خليط الوقود-الهواء يمر خلال أنبوب ويحترق عند رأس الموقد.

مواقد التبخير من نوع الفتيل (Wick Type) المستخدم للكيروسين عالى النوعيه، حيث يقوم الفتيل برفع الوقود السائل من الحوض بآداء الخاصية الشعرية. الإشعاع من اللهب والأسطح الساخنه المجاورة تبخر الكيروسين من رأس الفتيل. الأبخرة ندخل إلى الفضاء الحلقى بين أسطوانتين عموديتين معدنية مثبتين ويحترق فى الهواء المسحوب خلال الثقوب بالسحب الطبيعي. الإحتراق يحدث خلال الفضاء الحلقى بلهب أزرق. تلك المواقد تستخدم كمواقد طهى. الإختلافات فى نوع موقد الفتيل (الذى له طاقة حتى 5 كجرام/الساعة) ومناسب فى الغلايات المنزلية، وفى التدفئة والتى يمكن تنظيمها فى المواقد من نوع الفتيل العادى يكون التحكم فى معدل الإحتراق بتغيير طول الجزء المعرض من الفتيل وهو أقل كفاية.

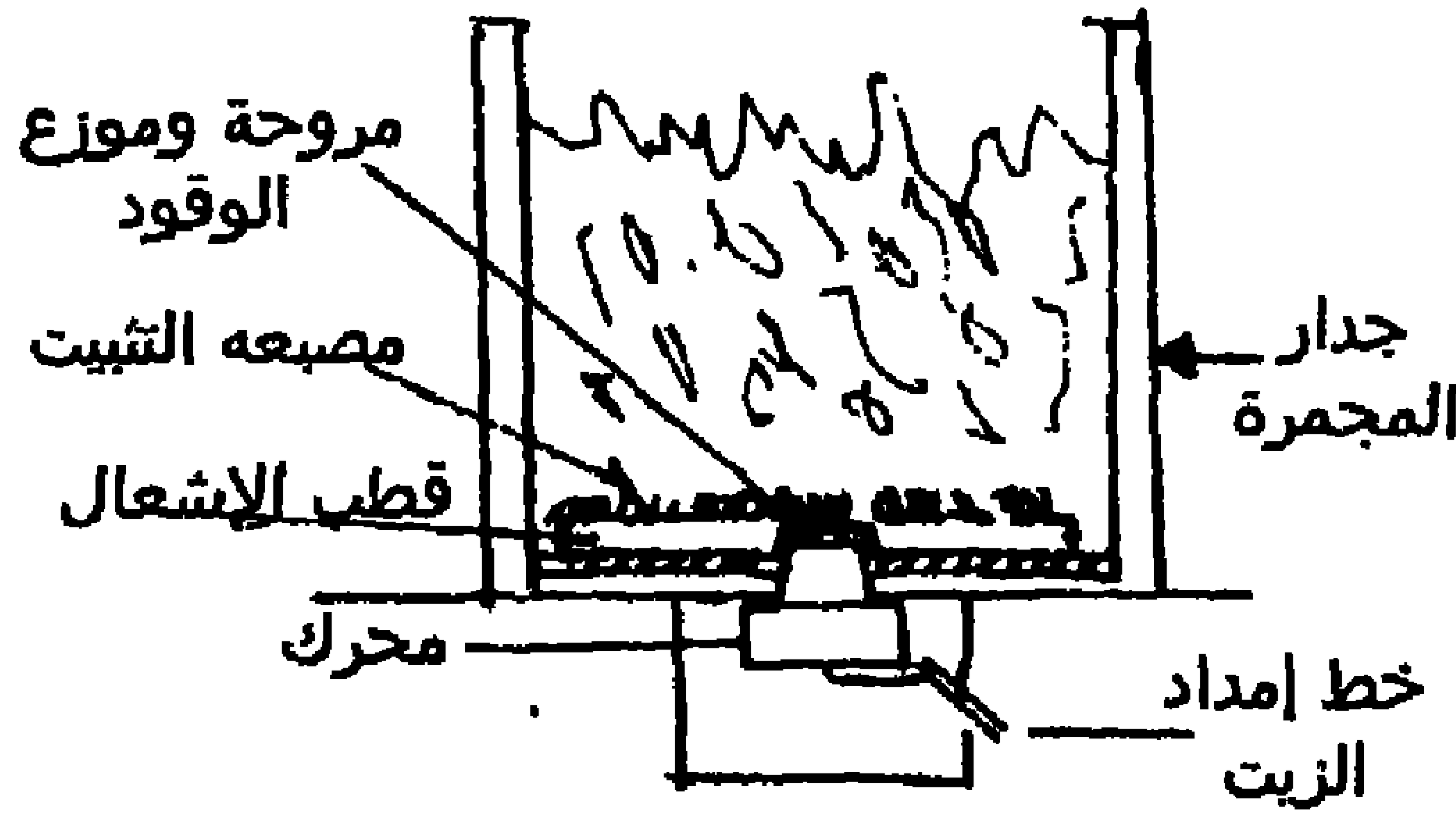
فى نوع موقد التبخير من نوع البوتقه (Pot-Type) الموصح فى الشكل رقم (30) يوجد مستقبل للوقود عند القاع، إمداده بواسطة خط الزيت. يتم تسخين سطح الزيت بالإشعاع من اللهب والحوائط الساخنه. الأبخرة تختلط مع الهواء الأولى الذى يدخل خلال عامود مركزى وجدار البوتقه. خليط الوقود الهواء يكون غنى جداً عند سطح الزيت لمساعدة الإحتراق. بعد إلى أعلا يكون مخففاً بالهواء ويصبح قابل للإشتعال. اللهب يتم تدعيمه عن قمة البوتقه. تلك المواقد تعمل على السحب الطبيعي أو بالقوة. يستخدم الكيروسين السوبر أو الجازولين. تكوين السناج يحتم نظافة بوتقه الموقد من آن إلى آخر. الطاقة هى حتى 10 كجرام/الساعة.



شكل(30): موقد التبخير من نوع البوتقة

لهب مسح الحائط : (In Wall – Wiping Flame)

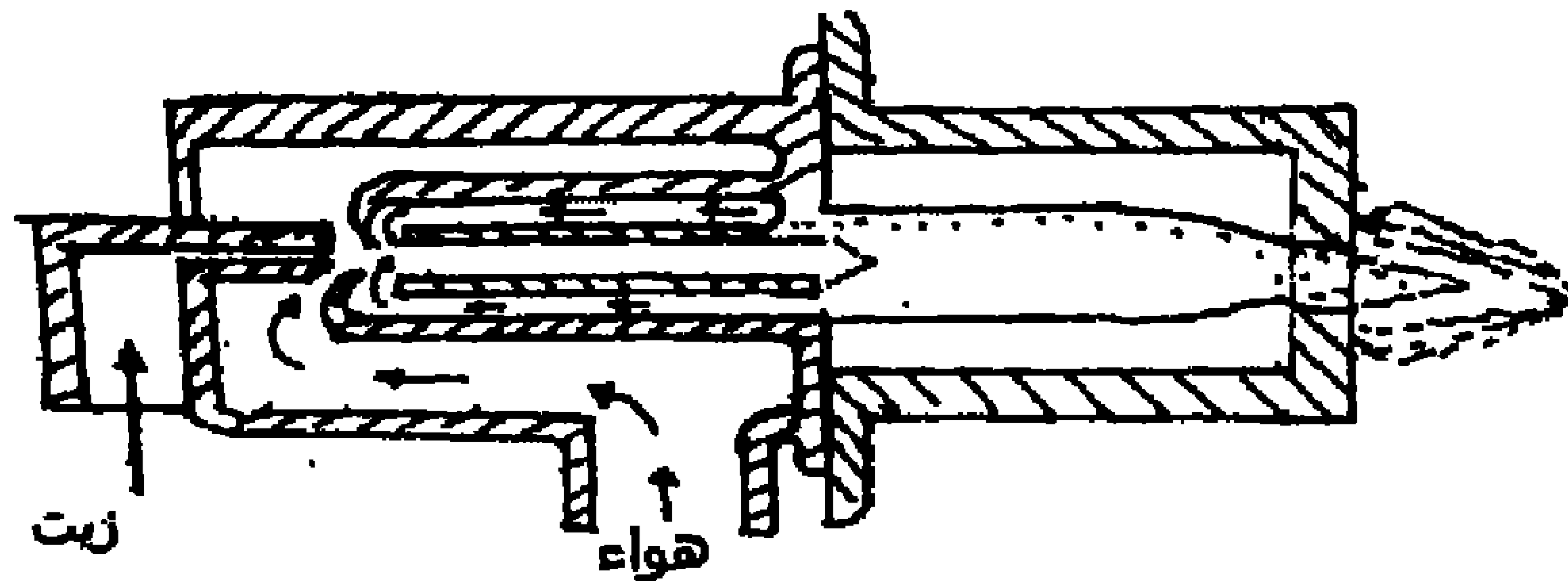
مواقد التبخير الدوارة الموضحه في الشكل (31) (والتى تستخدم الترزيز الخشن قبل تبخير الوقود)، هى الدوام الحلزونى الموجود في المركز حيث يوزع الزيت فى شكل رشات ذات نقاط كبيرة التى تصطدم بجدار الموقد الساخن من الصلب المقاوم. الأبخرة المخلوطة مع الهواء (التى يتم توجيهها نحو الجدار بواسطة مروحة) ترتفع إلى أعلا وتحترق على مصبعه التثبيت (Stabilizing Grill) بلهب أزرق. اللهب يحترق حول المحيط الداخلى للفرن فقط/ ومن هذه الحقيقة أخذ إسمه المميز. تلك المواقد يمكنها حرق حتى 30 كجرام/الساعة من الوقود. متطلبات الطاقة تكون منخفضة والإستخدام بدون صوت. يستخدم الكيروسين والزيت الخفيف.



شكل (31): موقد اللهب الدوار بالتبخير ويمسح الجدار باللهب

فى مواقد (Petro-max) التى تحرق الكيروسين، فإن نافورة وقود متحركة إلى أعلا ترتطم مقابل سطح المعدن الساخن عند سرعة عالية والأبخرة الناتجة تحترق بلهب قصير وكثيف فوق سطح المعدن. يتم تخزين الوقود فى خزان صغير أسفل خط الوقود ويتم الإمداد بضغط الزيت بواسطة ضغط الهواء فى الخزان بواسطة المكبس الذى يعمل بالإستخدام يدوى. له مخاطر حوادث وله صوت عند التشغيل.

فى موقد التبخير عالى السرعة الموضح فى الشكل (32) . يتم الحصول على معدل عالى بترزيز الوقود السائل المتطاير وتدوير غازات الإحتراق الساخنه خلال الموقد. الموقد يحمل الإختلاف ما بين مواقد التبخير والترزيز. غرفة الإحتراق تستقبل أبخرة الوقود فى الأول ونقاط الوقود فى الثانى.



شكل (32): موقد التبخير عالى السرعة

مواقد ترزيز الزيت: Atomizing Oil Burners

ترزيز الزيت يخلق مساحة سطحية ضخمة لوحدة الوزن للوقود والتى تساعد الإحتراق الغير متجانس للوقود السائل والمؤكسد الغازى. مواقد الترزيز لها نظام للترزيز للوقود السائل قبل حدوث الإحتراق الحقيقي. يوجد ثلاث أنواع من مواقد الترزيز (تختلف فيما بينها طبقاً لمبدأ الترزين) وهى موقد الترزيز بنافورة الضغط (Pressure Jet).

موقد الترزيز مزدوج المائع (Twin Fluid)، اللافح (Blast) ، موقد الترزيز الدوار (Rotary Atomizing).

لإحداث الترزيز، يتم أولاً الحصول على نافورة أو طبقة رقيقة ويسمح لها بالخروج إلى الجو المفتوح عند سرعة مناسبة. كلا من النافورة والطبقة الغير مدعمه غير مستقر ينكسر إلى نقاط. الإضطرابات مثل دوامة النافورة أو دوران الطبقة يسرع من عملية التفتت.

إنخفاض اللزوجة وإنخفاض الجذب السطحي يكون مطلوباً لسهولة تشتت وتكوين النقاط الصغيرة. يدعم الترزيز بمقاومة وإحتكاك واضطراب الهواء. مقاومة الهواء والإحتكاك يصبح مؤثر عند حدوث أى ثني أو إعوجاج لسطح النافورة. تلك القوى تكون كبيرة عند حالات الفرن بسبب زيادة لزوجة الهواء عند درجات الحرارة العالية. الإضطراب المحلى فى الهواء يسبب تشوه وتفتت للنقاط. زيادة سرعة السائل تزيد من الإضطراب فى السائل وكذلك المقاومة، الإحتكاك وإضطراب الهواء، وبالتالى درجة أعلا من الترزيز. نافورة الوقود عاليه السرعة تتفتت إلى عدد من النقاط الكبيرة وعدد أكبر كثيراً من النقاط الثانوية. ترزيز الوقود يتقدم خلال إختراق الرش نحو المجال المحيط والرش الناتج له مجموع من النقاط ذات أحجام مختلفة. الحجم الصغير للنقاط (أقل من 25 ميكرون) وهو يساعد فى الإشعال الأولى ويعزز ثبات اللهب حيث النقاط الصغيرة تتبخر بسرعة وتتكسر وتحترق. اللهب الناتج يساعد على إحتراق تلك الكبيرة. النقاط الكبيرة جداً لا تحترق تماماً فى الوقت المتاح وهى عندئذ تسبب تعقيدات بترسيبها على حوائط غرفة الإحتراق.

مواقد الترزيز بنافورة الضغط : Pressure Jet Atomizing Burners

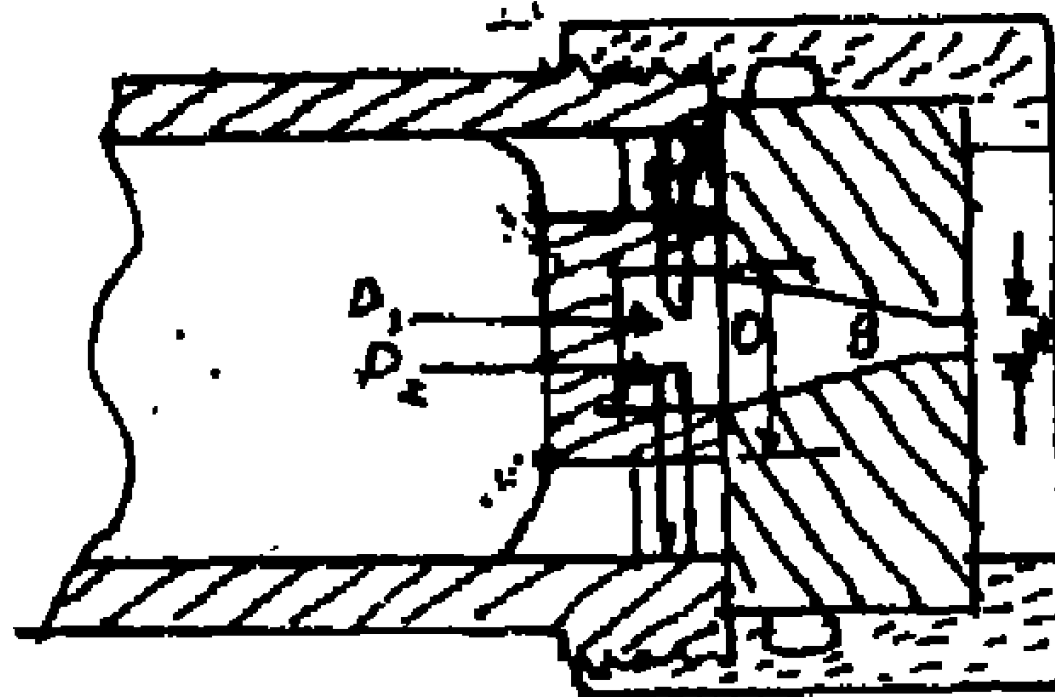
مواقد الترزيز بنافورة الضغط من نوعين هما :

- نوع الفتحة المستوية (Plain Orifice Type) المستخدم لحقن الوقود فى محركات الديزل ومحركات الإحتراق الداخلى الأخرى.
- نوع الطرد الركزى الدوامى (Centrifugal Swirl Type) المستخدم فى الغلايات الصناعية الضخمة.

فى الأول يستخدم ضغط عالى جداً للزيت حتى 350 كجرام /سم^2 أو أكثر.

وفى النوع الدوامى يكون الضغط أقل كثيراً (7-35 كجرام/سم^2) للمواقد.

المرزز من النوع الدوامى موضح فى الشكل (33). يدخل الزيت غرفة الدوامة الإسطوانية خلال فتحات ذات فاصل مماسى (D_2,D_1) وتدور فى الغرفة حول لب الهواء كتلة السائل الدوارة تخرج خلال الفتحة (O)، تحت تأثير القوة الإنتقالية (التى تحركها إلى الأمام) وقوة الطرد المركزى (التى تجعلها تطير إلى الخارج مماسه) بما ينتج عنه تكوين نقاط من الرش.



شكل (33): موقد من نوع دوامة الزيت بالطرد المركزى

لزوجة السائل يجب أن تكون حوالى 70 ريدوود (70 Redwood) على الثانية للفنيات الصغيرة وحوالى 100 ريدوود / الثانية للفنيات الكبيرة.

خرج رزاز الضغط (Q) يزداد بزيادة ضغط الزيت (P) (طبقاً لـ $P^5 \alpha Q$) ويقل مع الإنخفاض فى لزوجة الزيت.

الحجم المتوسط للنقطة (d) يزداد بزيادة اللزوجة، ويتغير عكسياً مع ($p^{0.35}$) ويزداد مع قطر الفتحة. حالات حجم النقطة ما بين 10 ميكرون إلى 22 ميكرون.

المرززات البسيطة من نوع نافورة الضغط الدوامى لها نسبة رجوع (Turn Down) محددة (بسبب إعتماد الخرج على ضغط الزيت) كتغير متسع لضغط الزيت من 7 إلى 35 كيلو جرام/سم^2 يسمح بنسبة رجوع 1 : 2.2 فقط. هذه الحدود تزال فى التصميمين المطورين لرزازات ضغط

النافورة الذى فيه تحدث بنسبة رجوع حتى 10 : 1 يمكن تحقيقها. فى نوع الإنسكاب (Spill type) يكون معدل الصرف متغيراً بتوفير ممر تبادلى (By-Pass) . فى تصميم آخر، يتم تحقيق ذلك بوجود عدد من الفتحات الماسة لدخول الزيت نحو غرفة الدوامة وتغير عدد الفتحات المتاحة بواسطة مكبس منزلق.

مواقد الترزيز بضغط النافورة تكون هادئة جداً، وتكاليف تشغيلها منخفضة، ومتطلبات طاقة أقل من كل مواقد الترزيز. وهذه هى الأكثر إستخداماً بين كل مواقد الترزيز. مثل هذه المواق ذات طاقة حتى 4500 كيلو جرام/الساعة من الزيت متاحة. مواقد الترزيز بنافورة الضغط لها حساسية للإنسداد بواسطة الزيت الوسخ. الزيت يجب ترشيحه / تصفيته لهذا السبب.

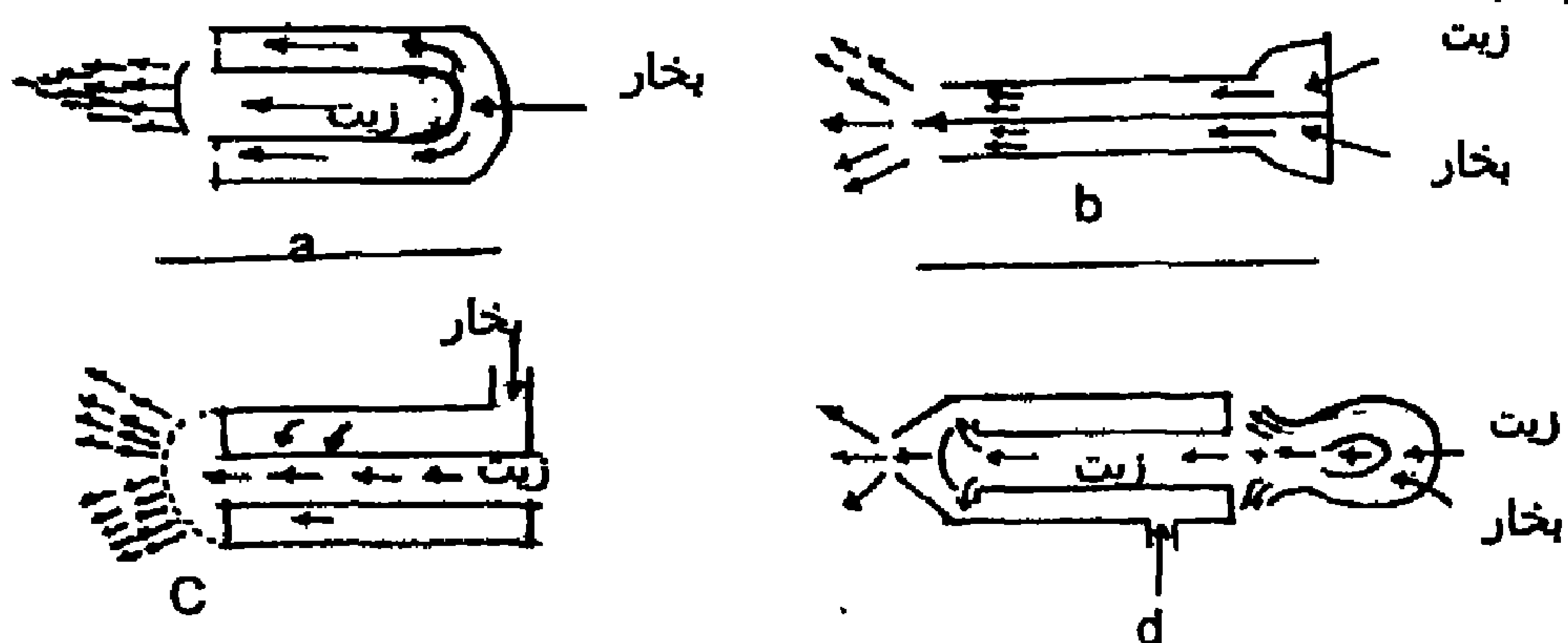
مواقد المائع المزدوج أو لفح الترزيز:

Twin Fluid Or Blast Atomizing Burners.

هذه المواقد تستخدم الهواء أو البخار لترزيز الزيت وهى من ثلاث أنواع:

1. نوع الضغط المنخفض باستخدام الهواء عند 30-35سم.
2. الضغط المتوسط باستخدام الهواء عند 0.4 – 1 كجرام / سم^2.
3. الضغط العالى باستخدام الهواء أو البخار عند ضغط يزيد عن واحد كجرام/سم^2.

كل من هذه الأنواع يمكن أن يكون ثابتاً إما من نوع الخلط الداخلى (Inside Mix) أو الخلط الخارجى (Outside Mix). بعض نظم الخلط الداخلى والخلط الخارجى كما هو مبين في شكل (34).



شكل (34): مواقد الترزيز بالمائع المزدوج

أنواع الخلط الداخلى المستخدمة عادة توفر كفاءة عالية عند معدل عالى للصرف، نسبة رجوع وبناء لهب مرن.

المبدأ العام في أجهزة الترزيز تلك هو واحد. الزيت يتدفق خلال أنبوب مركزى بمعدل محكم والمائع الإضافى يقابله يميل بزاوية سبق تعيينها، مع خروجه من الأنبوب. نظراً لأن متطلبات الطاقة تقابل بالمائع الإضافى لذلك فإن ضغط الزيت يلزم أن لا يزيدعن ذلك المطلوب لتأكيد تجانس التدفق خلال فتحة الفنيه (Nozzle). الطاقة الحركية المطلوبة للمائع الإضافى للترزيز فى كل الأنواع من أجهزة الترزيز ذات المائع المزدوج هى نفسها، لذلك فإن زيادة الضغط للمائع الإضافى تقلل الكمية المطلوبة. أجهزة الترزيز بالضغط العالى تحتاج فقط 2-3 ٪ من كل هواء الإحتراق للترزيز بينما هذا الرقم يكون 3-5٪ للضغط المتوسط ومرتفع حتى 20-100٪ لمواقد الضغط المنخفض. على أساس الوزن، متطلبات البخار تكون مشابهه لمتطلبات الهواء (0.3 كجرام/كجرام زيت) فى وحدات الترزيز ذات الضغط العالى.

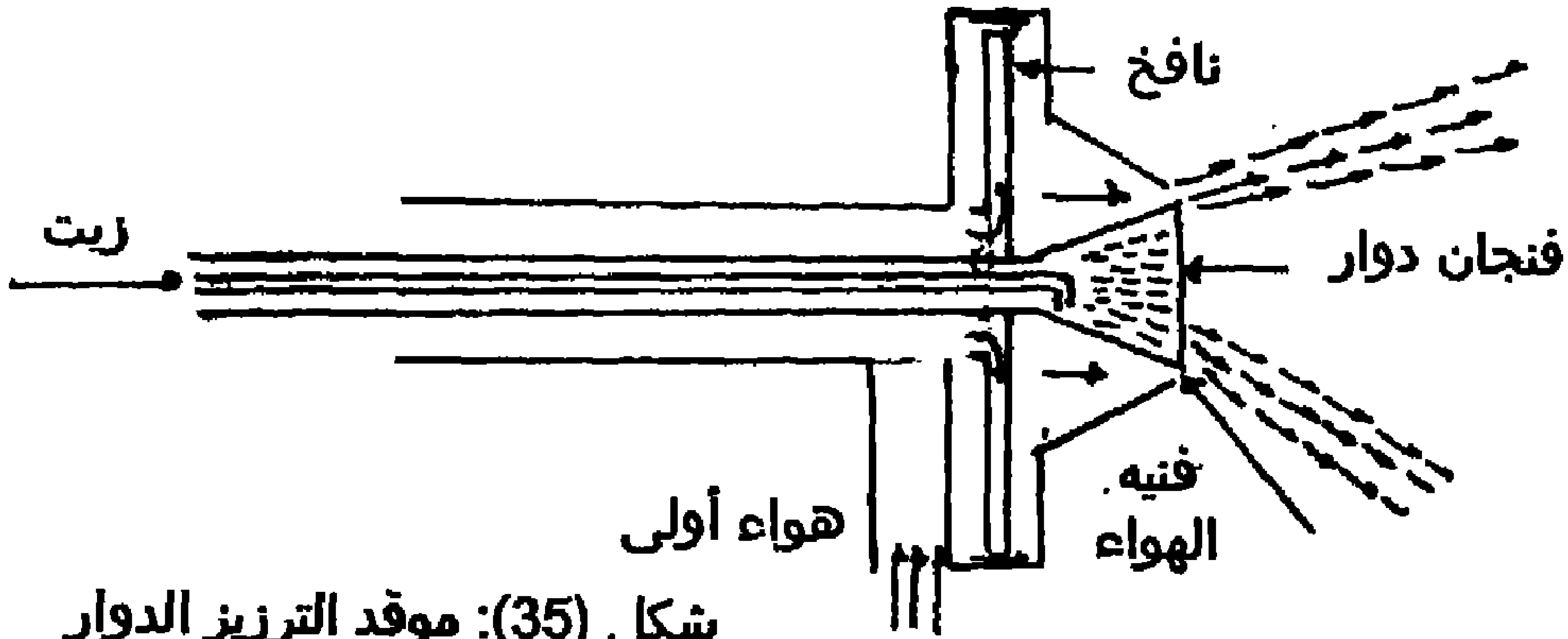
نسبة الرجوع العالية حتى 10: 1 يتم الحصول عليها مع المواقد بالضغط العالى والضغط المتوسط. وحدات الضغط المنخفض لها عادة نسبة رجوع منخفضة من 2 : 1 إلى 5 :1. مواقد الضغط المرتفع والضغط المتوسط تستخدم معظم هواء الإحتراق كهواء ثانوى وبذا إمكانية الإستعادة العالية للحرارة المفقودة وذلك بالتسخين المسبق للهواء. تكاليف ضغط الهواء فى مواقد الضغط العالى مرتفعة جداً، لذلك يستخدم البخار لترزيز الوقود الثقيل ووقود قار الفحم الذى يتطلب التسخين المسبق للحصول على اللزوجة الصحيحة.

وحدات الضغط المنخفض تستخدم فى المنشآت المنزلية والصناعية. مواقد الضغط المنخفض الصناعية (ذات طاقة حتى 2000 كجرام/الساعة) تستخدم أنواع خفيفه من زيت الوقود. المواقد ذات الضغط المتوسط تستخدم فى الغلايات والأفران حيث المطلوب مرونه عاليه وإعادة توليد الحرارة أو الإسترجاع.

عند إستبدال البخار بالهواء المضغوط، فإنه يمكن الحصول على نفس نوعيه الترزيز عند ضغط منخفض جداً. مواقد الضغط العالى للبخار تستخدم فى الإنشاءات الضخمة حيث يتوفر البخار بالضغط العالى. تلك المواقد لها طاقة حتى 3500 مجرام/الساعة. زيت الوقود الثقيل يمكن حرقه بواسطة مواقد بضغط البخار العالى. يلزم التسخين المسبق القليل للزيت عند استخدام البخار لترزيزه . البخار يجب أن يكون عند ضغط يزيد عن ضغط الزيت. شكل اللهب يتغير بتغير أطراف الفنيه (Nozzle Tips).

مواقد الترزيز الدوارة : (Rotary Atomizing Burners)

تلك لها خط وقود ثابت والذى يسلم الوقود إلى السطح الداخلى إلى الفنجان الأجوف المستدق الدوار. الفنجان يدور (عند 3600 – 1000 لفة فى الدقيقة) والإحتكاك بين الزيت وسطح الفنجان وبسبب دوران الزيت مع الفنجان. قوة الطرد المركزى المدعمه باستدقاق الفنجان (Tapering Of The Cup) تسبب تدفق الزيت نحو الحافة. أخيراً يندفع الزيت بقوة فى شكل طبقة رقيقة التى تتفتت إلى نقاط صغيرة. مخطط لموقد الترزيز الدوار موضح فى الشكل رقم (35).



شكل (35): موقد الترزيز الدوار

حوالى 15٪ من هواء الحرق (يتم إمداده كهواء أولى بالمروحة المتصلة بعامود الإدارة الدوار لمحرك إدارة الفنجان) عند ضغط من 10 إلى 25 سم ماء والذى يعطى حركه أمامية للرش وكذلك إنتاج قوى ترزيز إضافية على النقط (Droplets). الهواء الثنائى يتم إمداده إلى الباب أسفل أو خلال فتحة فى الأرضية ذات المربعات، السحب يتم توفيره بالمدخنه. يتم الحصول على حجم نقطة الوقود مقداره 50 ميكرون.

ضغط الزيت يجب أن يكون منخفضاً (5-8 سم ماء)، واللزوجة تكون فى المجال من 100-300 ريدوود/ الثانية. الرزازات الدوارة يمكنها تحمل لزوجة أعلا مقارنة بالآخرين. قد يكون لهم كفاءة ترزيز مفقودة عند اللزوجة المنخفضة. مثل هذه اللزوجة المنخفضة تستخدم فى وجود نظام نافورة الضغط قد يسبب الإنزلاق للزيت خلال الفنجان. كذلك فإن مشكلة الإنسداد بالوساخة تكون قليلة. ولكن توجد فرصة كبيرة لترسيب الكربون بالتكسير بسبب الإشعاع من المجال المحيط بعد توقف الموقد.

مواقد الترزيز الدوار تستخدم كثيراً فى الغلايات والمنشآت الصغيرة نسبة رجوع عاليه 16 :1 وطاقة 800 كجرام / الساعة تكون متاحة. الطاقة أقل كثيراً عن أقصى طاقة لأنواع أجهزة الترزيز

الأخرى. مواقد الترزيز الدوارة تكون مدمجة، كفؤ، تكون منخفضة السعر نسبياً، ومتطلبات الطاقة منخفضة نسبياً.

الوحدات الدوارة عادة يتم تجهيزها في أفقياً حوائط الفرن، رغم أن القليل من الوحدات المنزلية لها عامود رأسي.

نظام التغذية بالتقطير فى حرق الزيت:

Drip Feed System In Oil Burning

عندما تكون غرفة الإحتراق تزيد عن 600°م ونظام التغذية يمكن توفيره تقليدياً في الغرفة، فإنه يمكن إستخدام طريقة بسيطة جداً ورخيصة لحرق الزيت. تتم التغذية بالجاذبية لزيت الوقود خلال أنبوب معدنى إلى المجال الساخن أو الفرن. يتم إحكام معدل التغذية بواسطة محبس. تسقط نقاط الزيت على تيار هواء الإحتراق الذى يتم سحبه من الغرف التى يتم فيها التبريد. الإحتراق يكون سلسل إلى حد ما والإحتراق يكون ثابتاً. هذا النظام مناسب لبعض الأفران المستخدمة في صناعات السيليكا.

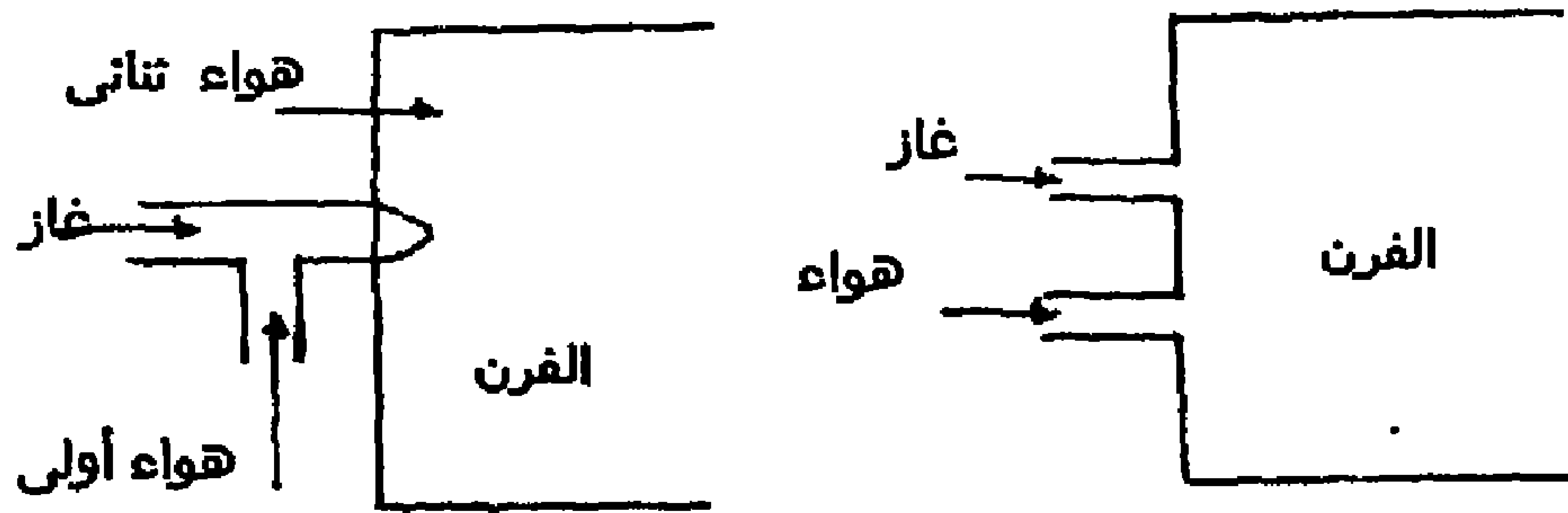
المواقد المستخدمة فى إشعال الوقود الغازى:

Burners Used for Gaseous Fuels Firing:

توجد طريقين لحرق الوقود الغازى وهي :

1. يتم الخلط المسبق للغاز والهواء ثم الإشعال في غرفة الفرن. هذه تسمى الموقد السابق الخلط أو نوع الخلط الداخلى للموقد حيث جزء فقط من الهواء اللازم للإحتراق يتم خلطه مع الغاز. وهذا يسمى الهواء الأولى. الهواء الثنائى وهو باقى الهواء يتم إمداده منفصلاً فى الفرن. موقد بنزن هو مثال لهذا النوع من المواقد .
2. التدفق المنفصل لكل من الغاز والهواء والخلط معاً في الفرن مع تقدم الإحتراق. هذا يسمى الخلط الخارجى للموقد أو موقد تسرب اللهب أو موقد نافورة الخلط.

مخطط يوضح مواقد الخلط الداخلى والخلط الخارجى شكل رقم (36).

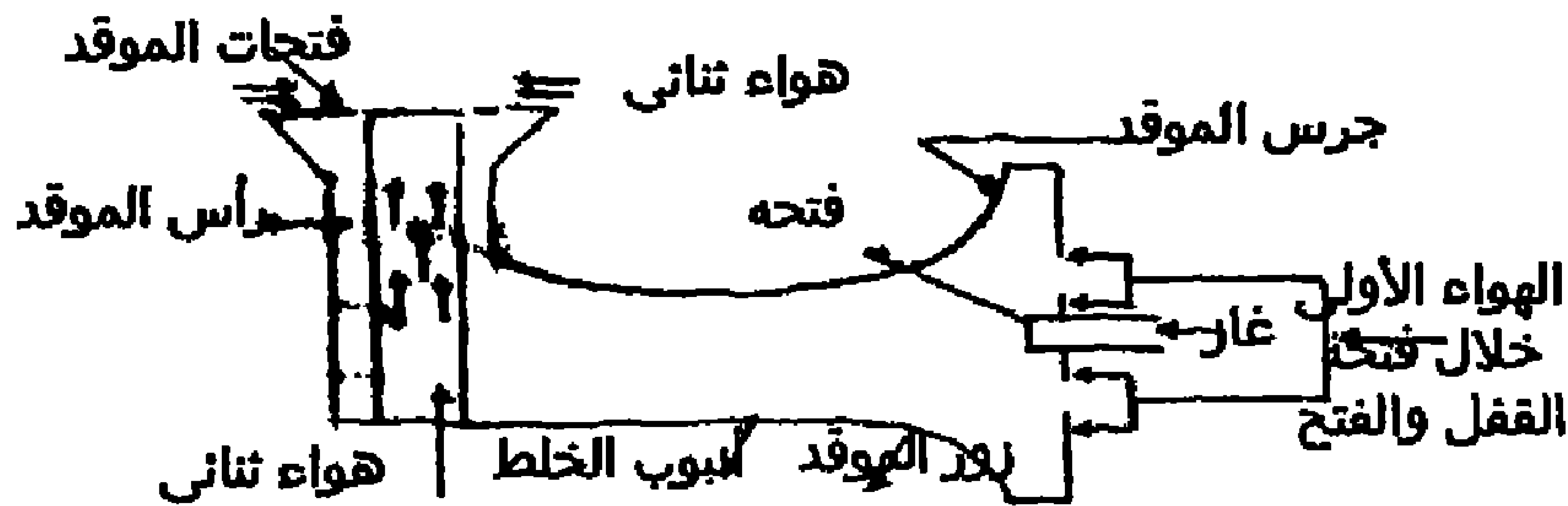


شكل (36): مواقد الخلط الداخلى والخلط الخارجى

طريقة الخلط المسبق تقسم مواقد الخلط إلى الآتى:

1. مواقد الحرق الغاز المهواه أو الجوية:

هنا الطاقة الحركية للغاز تستخدم لإمتصاص الهواء من الجو إلى أنبوب الخلط الذى عند نهايته يوجد رأس الموقد. موقد بنزن يعتبر نموذ. طبقاً لضغط الغاز، قد يكون هناك سحب للغاز منخفض الضغط (7.5-20 سم ماء) سحب غاز عالى الضغط (0.25 كجرام/سم^{2}وأعلا). نموذج لموقد الغاز المهوى موضح فى الشكل رقم (37).



شكل(37): موقد الغاز الجوى المهوى
(إمتصاص الغاز بالضغط المنخفض)

2. مواقد الغاز بسحب الهواء: Air Aspiration Gas Burner

هنا يتم إمداد الهواء عند ضغط متوسط من 0.15-35 كجرام/سم^2 أو أعلا. طاقته الحركية تستخدم فى سحب الغاز (7.5-20 سم ماء) إلى جسم المصاصه (Aspirator) لخلط الإثنين ثم دخول الخليط إلى غرفة الإحتراق. يتم إمداد الغاز عند ضغط ثابت يتم إحكامه بواسطة منظم.

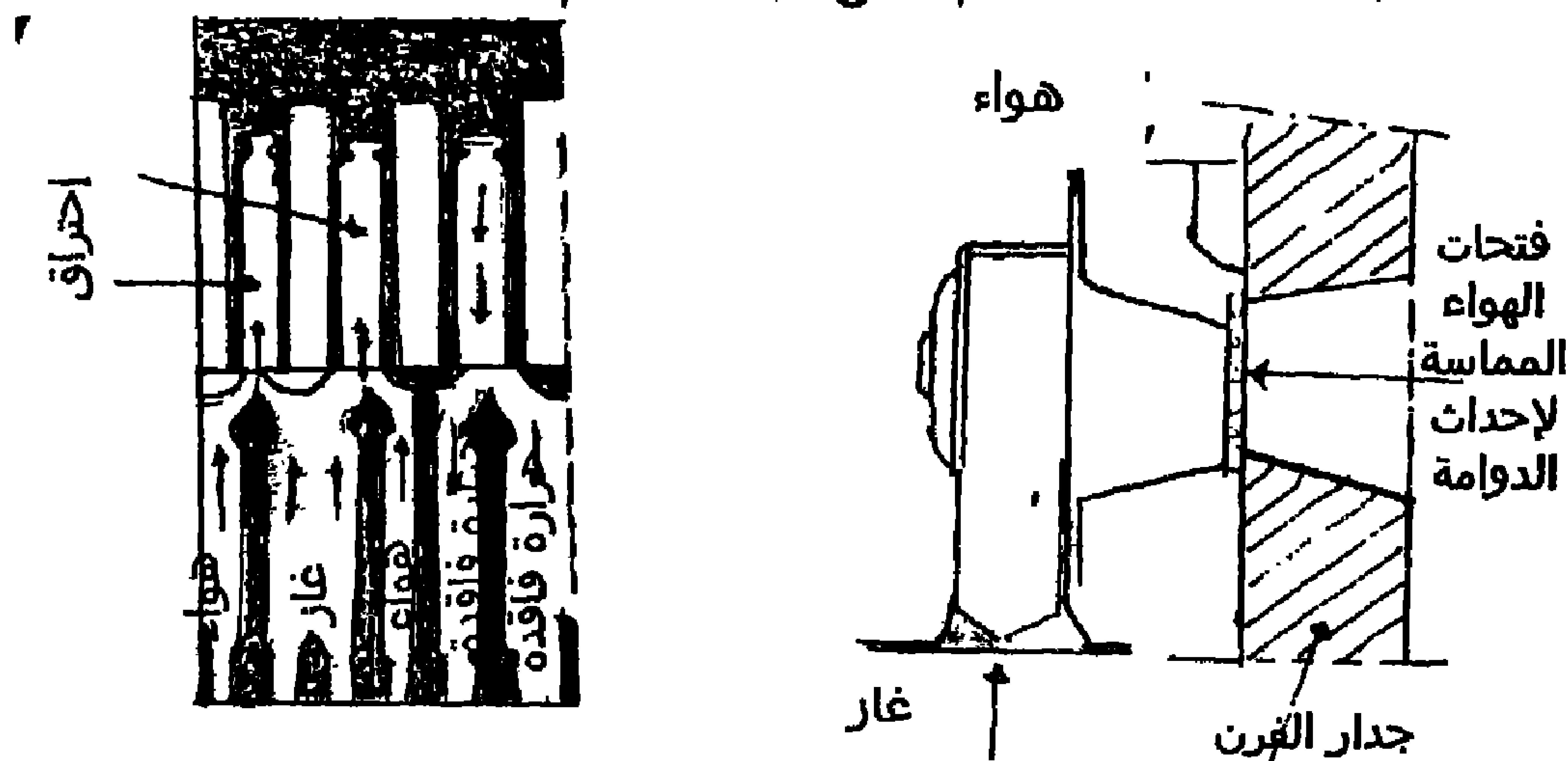
3. المواقد بالإمداد المستقل للغاز والهواء إلى الخلط:

هنا، يتم خلط الوقود والهواء بالنسب المطلوبة وضغط الخليط ثم إرساله إلى غرف الإحتراق تحت الضغط. هذا النظام يحقق الخلط المسبق الكلى بكفاءة خلط عاليه.

الطرق النموذجية لتوصيل الغاز والهواء فى مواقد نظام خلط – الفنيه (Nozzle-Mix Type) الخلط الخارجى وصفه كالآتى:

• فتحات منفصلة للهواء والغاز:

هنا يتم دفع تدفقات الهواء والغاز كل على حدة إلى غرفة الإحتراق خلال فتحات ذات شكل وحجم مناسب. إدخال النظم المتوازية للغاز والهواء يستخدم للحصول على لهب تسرب للتسخين المتجانس لفضاء كبير كما فى حالة أفران الكوك. بإمداد الغاز والهواء بزاوية التي تحدث دوامة للهواء، يتم الحصول على لهب قصير كثيف. عندما يكون خط الغاز فى شكل ماسورة طويلة مستقيمة، يسمى "البندقية". هنا النظام موضح فى الشكل رقم (38).



شكل (38) الإحتراق بالفتحات المنفصلة للهواء والغاز
(a) لهب طويل (فرن الكوك)- (b) لهب قصير

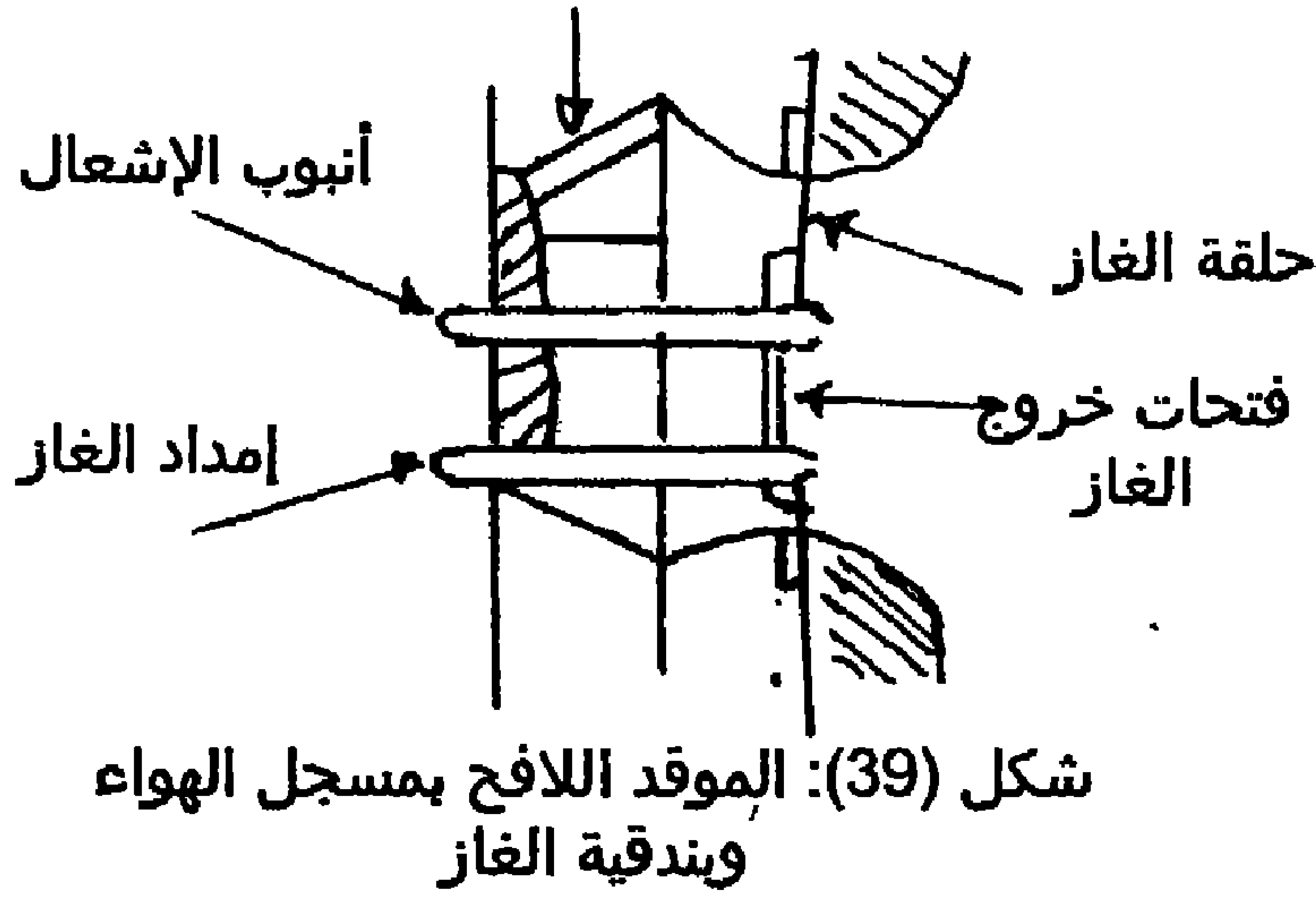
• فتحات الغاز ومصبعه تحكم الهواء (Air Register):

هنا يتم إمداد الغاز بواسطة بندقية الغاز إلى رأس الفتحة الواحدة أو المزدوجة بينما الهواء يتم إمداده بواسطة سحب تيار الهواء بقوة مصبعه التحكم.

مصبعه تحكم الهواء تحكم نوعيته. مثل هذه الوحدات تعطى لهب قصير وكثيف وغير براق.

لوح التشتت يكون منفصلاً بطرف الموقد لإستمرار السرعة البطيئة للغاز فى المنطقة الوسطى والتى تساعد فى الإشتعال الثابت وثبات اللهب. الناشر يعزز كذلك الخلط السريع للهواء والوقود.

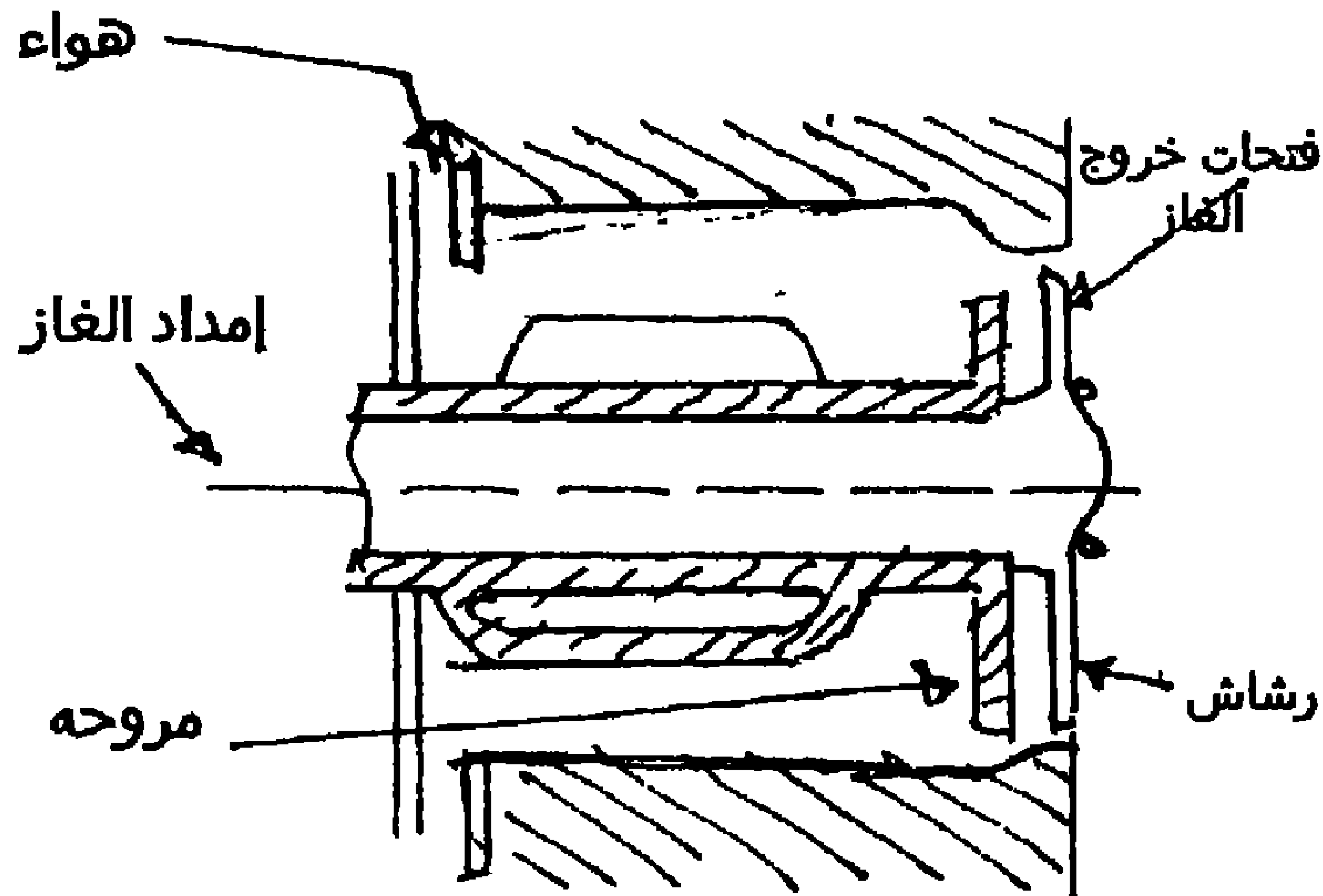
تلك المواقد تعرف بمواقد السفع (Blast Burners)أو اللافحة، وهى موضحه بالشكل (39).



شكل (39): الموقد اللافح بمسجل الهواء وبندقية الغاز

4. موقد الخلط بالمروحة (Fan-Mix Burner)

يمكن الحصول على معدل عالى للحرق بنظام الفنيه-الخلط هذا (Nozzle - Mix) باستخدام هواء زائد منخفض حتى 5٪. خط الغاز المستقيم ينتهى فى تربين (مصليه-تركيبه ذات أذرع شعاعية- Spider) له فتحات محفورة على جانب واحد من الريش. مروحة تكون متصله بالتربين. الغاز الخارج يعمل على تدوير التربين والمروحة. المروحة توصل هواء الإحتراق بزاويا قائمة إلى تدفقات الغاز. ينتج إضطراب عالى ويؤدى إلى خلط متقن جداً للغاز والهواء. كمية الهواء يتم إحكامها بواسطة فتحة التحكم فى الهواء (Air Shutter). هذا موضح بالشكل رقم (40).



شكل (40): موقد الخلط بالمروحة

بناء اللهب يصنف مواقد الغاز إلى الأنواع الآتية:

أ. موقد بطارية اليد: (Torch Burner)

هنا كل موقد يعطى لهب واحد مرئي من طرف الموقد.

ب. موقد الحلقة: (Ring Burner)

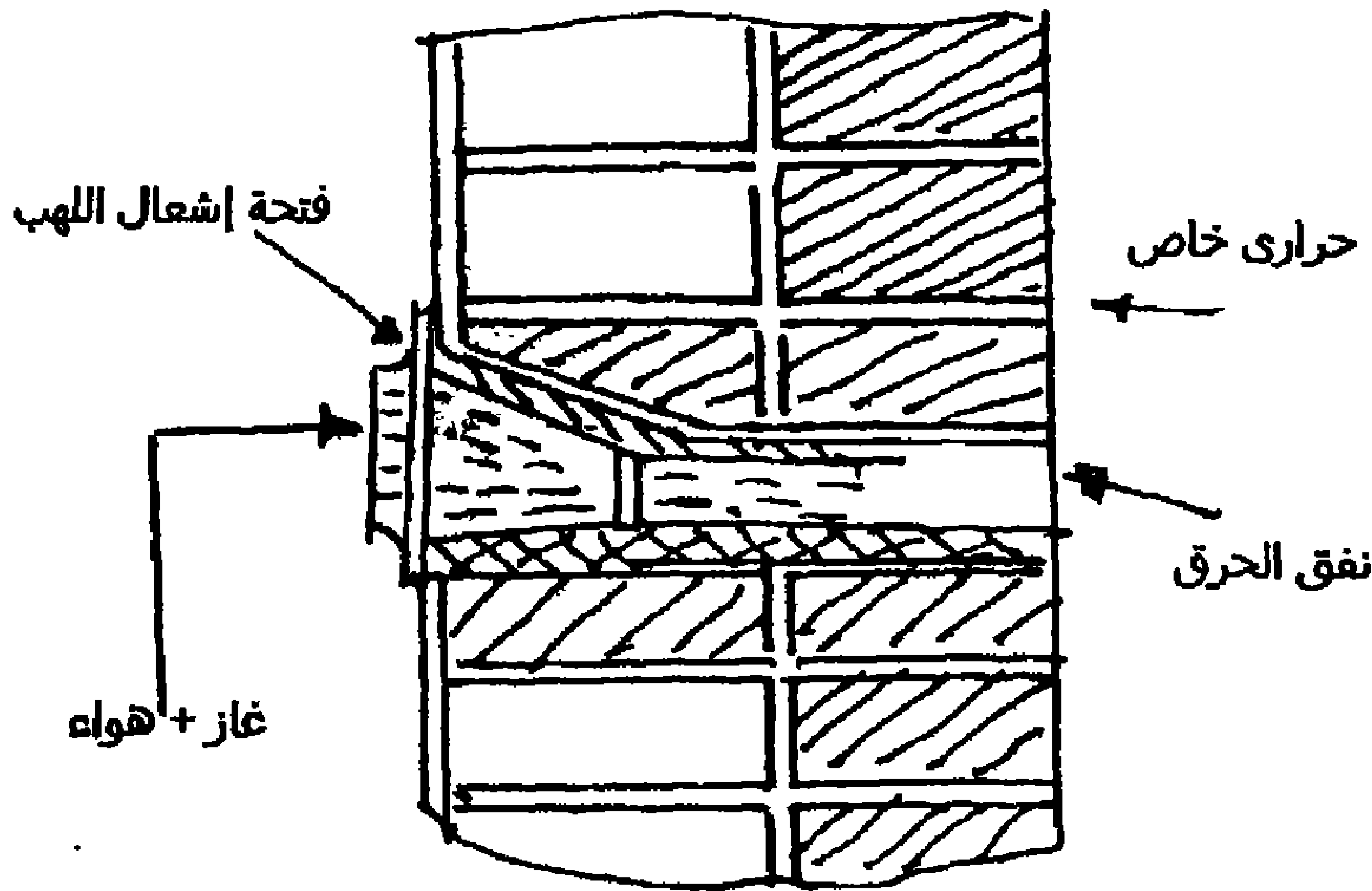
وهو عادة موقد جوى. راس الموقد تكون فى شكل حلقات متحدة المركز ذات ثقوب محفورة مناسبة.

ج. موقد الأنبوب: (Piper Burner)

هنا عادة يكون موقد جوى. أنبوب الخلط ينتهى فى ماسورة ذات ثقوب مخرومة أو فتحات أنبوب بارزة. هذه يمكن أن تكون متعددة – صف تخريم.

د. موقد الإحتراق بدون لهب: (Flame Less Combustion Burners)

فى نظام الإحتراق السطحى، يكون الإحتراق كلى على السطح الصلب ولا يتم رؤية أى لهب. هذه النظم تسمى الحارقات بدون لهب. يستخدم الإحتراق السطحى عند كل من السرعة العالية جداً والسرعة المنخفضة جداً والذى سوف يسبب مشاكل الإنطفاء وارتداد اللهب علي التوالى. الشكل رقم(41) يوضح موقد نفقى باستخدام مبدأ الإحتراق السطحى.



شكل (41): الموقد النفقى بالحرق السطحى

يتم التغذية بخليط الغاز والهواء خلال فتحه إلى نفق مستدير/مستطيل مشكلاً فى كتله حرارية. حوائط النفق المتوهجة تسبب الإحتراق السطحى بكثافة مرتفعة جداً (حتى 15000كيلو كالورى/الساعة × سم^2 من مساحة الفتحة).

الإنتقال الحرارى يكون بالإشعاع من الكتلة الحرارية المتوهجة. تلك المواقد لها صوت عند التشغيل الناتج عن تقدم الإحتراق فى شكل سلسلة من التفجيرات فى تتابع سريع داخل النفق. مواقد النفق تكون متشعبه (Manifold) فى مجموعات بحيث منسب واحد للغاز – الهواء يحكم المجموعة. الإحتراق يكون كاملاً بإمداد الهواء الأولى.

هـ. الحارقات النبضية: (Pulsating Combustion)

وهذه تتصف بظهور اللهب المرتفع من آن إلى آخر.

المواقد الآتية تعنى بتطبيقات خاصة:

1. مواقد غمر البطاريات اليدوية:

Immersion Torch Burners Pipe In Liquid

وهذه مناسبة فى تسخين المحاليل، المعادن والأملاح المنصهرة. أنابيب التسخين تكون مغمورة فى السائل. مواقد البطارية اليدوية تشتعل فى أحد نهايات أنابيب التسخين بينما الغازات العادمة تخرج من النهايات الآخرى. السائل يتم تسخينه بطريقة غير مباشرة بتسخين الأنابيب.

2. مواقد البطارية المشعة (الماسورة فى الهواء أو أى غاز آخر):

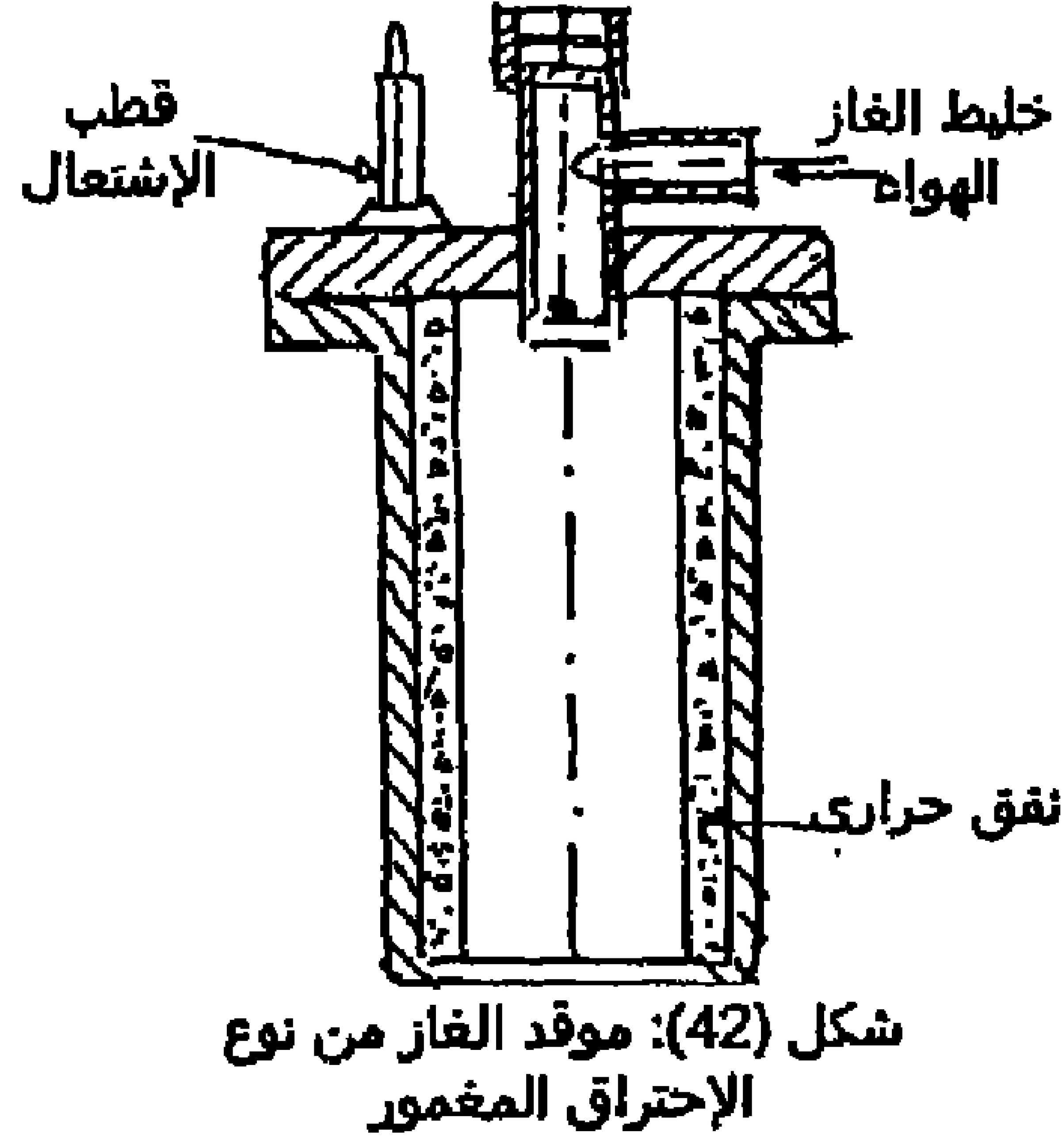
Radiant Torch Burners

هنا، يكون اللهب محتجزاً خلال الأنبوب التى تسخن الهواء أو أى غاز آخر. أى تلوث بمنتجات الحريق يتم لذلك تجنبه. تستخدم المواقد المشعه فى التجفيف الصناعى.

3. مواقد الإحتراق المغمور: Submerged Combustion Burners

نظراً لأن المواقد النفقية لاتحتاج أى هواء ثنائى للإحتراق فإن النفق الحرارى يمكن غمره فى سائل بدون إضطراب للإحتراق.

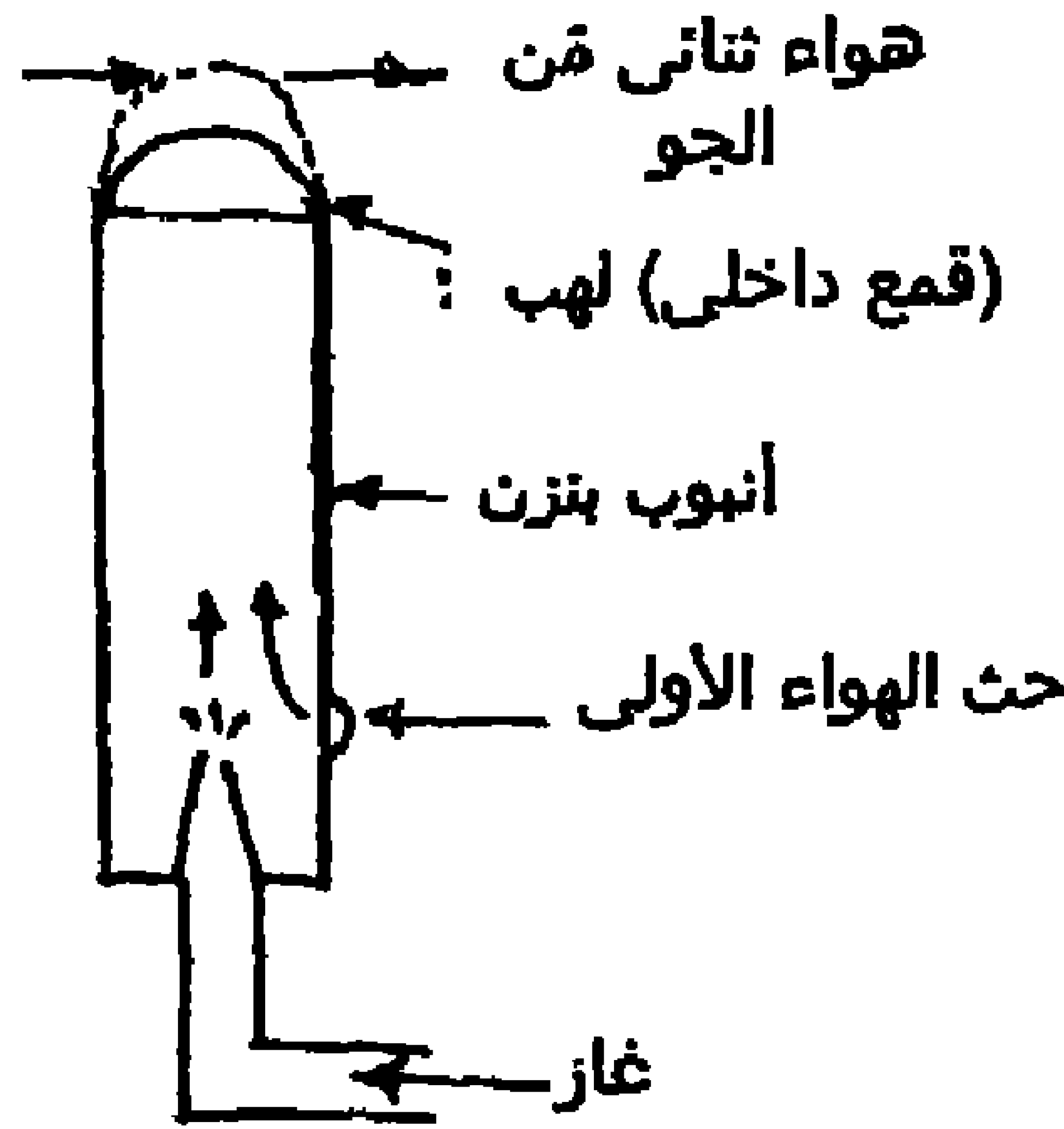
غازات الإحتراق سوف تعمل فقاعات خلال السائل الذى سوف يستقبل الحرارة من فقاعات الغاز الساخنه هذه. الشكل (42) يوضح موقد بسيط المستخدم لمبدأ الإحتراق المغمور. يتم الحصول على إحتراق أكثر كثافة وأكثر تجانساً بتوفير سطح حرارى إضافى داخل النفق. الإستخدام الرئيسي لتقنيه الإحتراق المغمور هو فى تبلر الأملاح (Crystallizing) حيث تكون ترسيبات سطح التسخين مشكلة حادة. تبني المواقد بطاقة حتى 1.3 مليون كيلو كالورى/الساعة. كثيراً من مثل هذه المواقد يمكن إستخدامه فى حوض واحد.



شكل (42): موقد الغاز من نوع الإحتراق المغمور

موقد بنزن: (Bunsen Burner)

المثال العادى لنوع الموقد بالخلط الداخلى هو موقد بنزن الموضح فى الشكل (43).



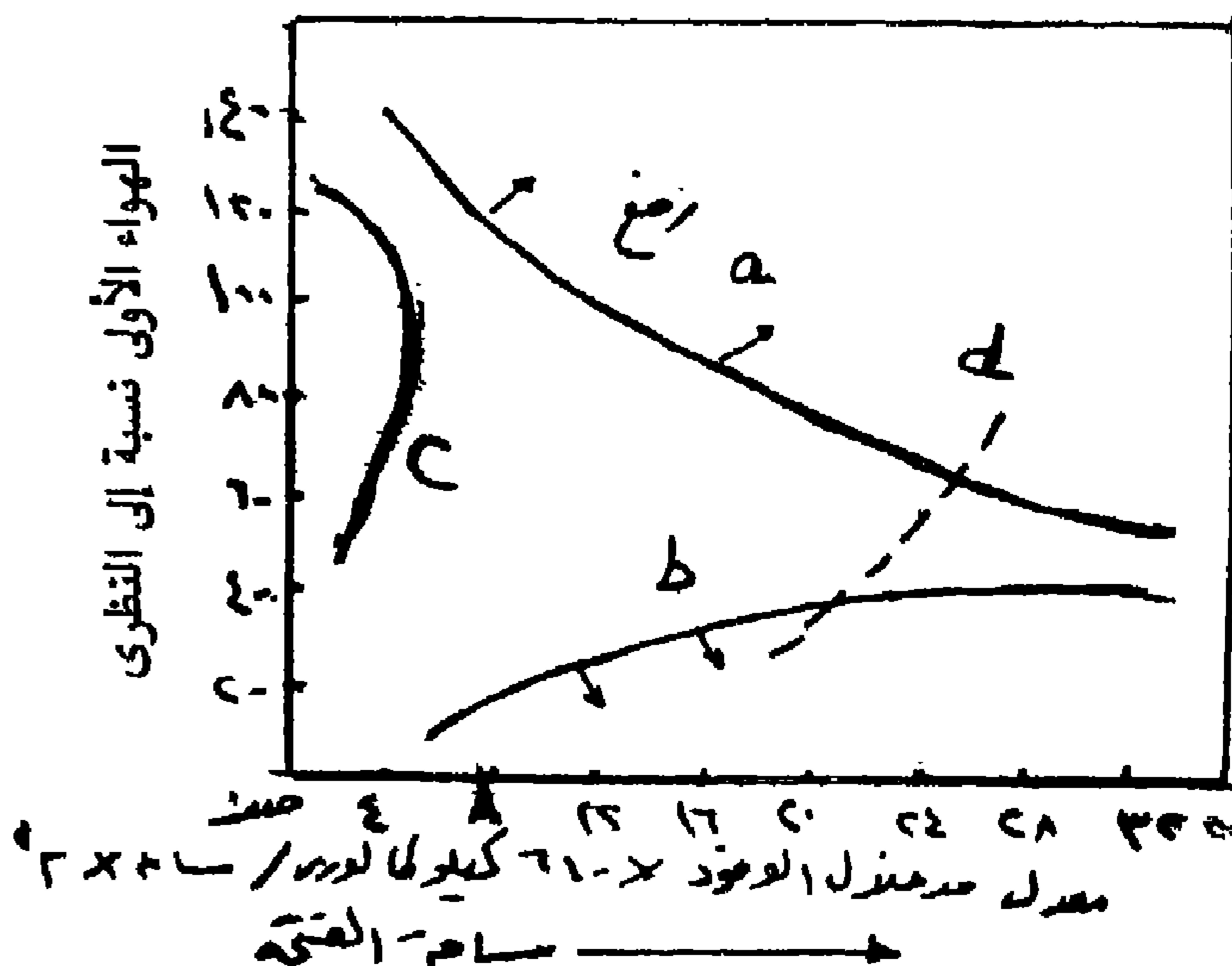
شكل (43): موقد بنزن

فى موقد بنزن (أو موقد الخلط الداخلى) ، يتم إحداث المص (Suction) بنافورة الغاز التى تسحب الهواء الأولى. يتم إمداد الهواء الثنائى من الجو إلى اللهب. خليط الهواء الأولى– الغاز يتم المحافظة على سرعته لتكون أعلا من سرعة اللهب لخليط الغاز–الهواء، بحيث أن اللهب لا يحدث له إرتداد للخلف فى أنبوب بنزن. فى حالة زيادة معدل سرعة الإمداد بالهواء الأولى عن سرعة اللهب، فإن اللهب يمكن إنطفاؤه من الأنبوب ويحدث إنطفاء للموقد. مع عدم كفاية (قليل) الإمداد بالهواء الأولى، فإن اللهب الناتج يكون طويلاً، كسولاً، ووهاج بدرجة قليلة والذى يعطى معدل إنطلاق حرارى منخفض. مع زيادة الإمداد بالهواء الأولى، فإن اللهب يقصر ويصبح غير وهاج معطياً معدل إنطلاق حرارى عالى.

مواقد الغاز الجوية : (Atmospheric Gas Burners)

هذه المواقد مبنيه على مبدأ موقد بنزن. الموقد الموضح في الشكل (37) يتكون من ثقب ثابت (مستدقه الطرف –Spud) لدخول الغازات، وفتحه محكومه الفتح والغلق (Controllable Shutter) لإمداد الهواء، أنبوب خلط في شكل الفنشورى ورأس الموقد ذات ثقوب محفورة فيها. المنطقة الضيقه لأنبوب الخلط تسمى الزور (Throat) الذى ينفرج (Diverge) أو يتباعد إلى الجزء الخلفى المسمى مخروطه (It's Bell) يتم التحكم فى معدل الغاز بواسطة محبس خط الغاز. عند دخول الغاز خلال الفتحه، فإن طاقته الحركيه تزداد بسبب سرعة حقنه العاليه حيث ينتج ضغط إستاتيكي منخفض عند الزور. يتم سحب الهواء الأولى نحو المخروط خلال ثقب الفتح والغلق (Shutter) للهواء. خلال التدفق خلال أنبوب الخلط من المخروط إلى رأس الموقد، فإن الغاز والهواء يختلطا بتجانس ويزداد الضغط الإستاتيكي من خلال تبطئ تدفق المائع. الخليط القابل للإحتراق في شكل لهب موقد صغير جداً مرتكزاً على ثقوب رأس الموقد. الهواء الأولى ليس كافياً لإكمال الإحتراق. الهواء الثنائي يتم سحبه على سطح اللهب من الجو المحيط بتيارات الحمل. كمية الهواء الأولى تعتمد على نوع اللهب، تصميم الموقد، معدل إمداد الطاقة ، ونوع الغاز.

خصائص العمل لموقد الغاز المهوى موضحه بواسطة مجموعة منحنيات كما فى الشكل رقم (44) حيث محاورة هى معدل إمداد الحرارة، والإمداد بالهواء الأولى.



شكل (44) خواص العمل للموقد المهوى

عمل الموقد بثبات ممكن فى المنطقة المتوسطة المحصورة بين المنحنيات d,c,b,a. المنحنى (a) يمثل حالات الرفع والتصريف (Lifting And Blow Off) ويضع الحد العلوى لمعدل تدفق الغاز والإمداد بالهواء الأولى. هنا الحد العلوى يتغير عكسياً مع كمية الهواء الأولى. لذلك فإن المعدل العالى لتدفق الغاز يتطلب زيادة كمية الهواء الثنائى. المنحنى (b) يمثل الحد السفلى للهواء الأولى. النسبة المنخفضة للهواء الأولى تعطى لهب طويل، أصفر متموج في المواقد المهواه والأنابيب مع تكون سناج وأول أكسيد الكربون من خلال الإحتراق الغير كامل. الإمداد بالهواء الأولى يصبح حرج نحو مجال معدل الإمداد بالغاز كما هو موضح بالمنحنيات ((b،a)) التى تميل إلى الإنفراج على الجانب الأيمن. أداء الموقد ليس كافياً فى هذه المنطقة. نسبة ثانى أكسيد الكربون فى الغاز العادم تزداد بحدة للعمل فى يمين المنحنى (d). ظروف إمتداد اللهب تسود على يسار المنحنى (c) والذى عندئذ يضع الحد الأدنى لمعدل دخول الغاز. الشكل (44) يبين أن موقد معين يمكن أن يعمل خلال مجال لمعدلات تدفق الغاز. أقصى معدل للغاز يتحدد بواسطة الإنطفاء (Blow Off)، الإحتراق الغير كامل أو عدم القدرة على سحب الهواء الأولى الكافى. الأدنى يكون محدوداً بارتداد اللهب (Flash Back). النسبة ما بين الأقصى إلى الأدنى لمعدل الغاز يتم الحصول عليها فى الموقد والتى تسمى نسبة الرجوع (Turn Down Ratio). المرغوب هو نسبة 5 : 1 فى معظم أدوات التسخين بالغاز. عند معدل غاز معين يتم الحصول على لهب طويل مضئ مع الإمداد المنخفض للهواء الأولى تقترب من 100٪ من النظرى.

كل المواقد سابقة الخلط أو السابق الخلط جزيئاً تعطى منحنيات ذات صفه مشابهه. الشكل النسبى ومكان المنحنيات المنفردة يتوقف على تصميم الموقد، ودرجة حرارة التشغيل ونوع الغاز المستخدم. فى المواقد ذات فنيه الخلط الخارجى لا يوجد هناك إرتداد للهب ولكن الإنطفاء يمكن أن يكون له علاقة بالظروف المقابلة.

فى المواقد الصناعية يستخدم إما مثبت اللهب فى شكل إختناق طبيعي (مثل الناشر) أو مبدأ الإحتراق السطحى.

البيانات التصميميه لمواقد الغاز المهواه:

Design Data For Aerated Gas Burner

بالنسبة للموقد البسيط المهوى الآتى بعد معادلات وبيانات تصميمه وهى:

$$V = 83.240 K.A.\sqrt{\frac{\Delta p.P}{TS}} \qquad (A)$$

حيث:

V= معدل تدفق الغاز متر مكعب فى الساعة عند الضغط ودرجة الحرارة العادية (Nm^3).

K= معدل الصرف (عادة 0.8 إلى 0.9 لفتحة الأنبوب الثابته).

A = مساحة الفتحة (الثقب) متر مربع.

ΔP= الهبوط في الضغط عند الثقب ، ماء.

P = الضغط الأولى للغاز، سم زئبق مطلق.

T= درجة حرارة الغاز (درجة كلفن).

S= الجاذبيه النوعية للغاز (الهواء = 1).

مع معرفة معدل التزويد بالطاقة (In Put Rate) والهبوط فى الضغط المطلوب فى الثقب، يكون من الممكن حساب قطر الثقب من المعادلة السابقة. الهبوط المطلوب فى الضغط يمكن حسابه من متطلبات الهواء الأولى بواسطة المعادلة التجريبية الآتية لطاقة التهويه للموقد.

$$P_A = \left(\frac{\sqrt[4]{PS}}{\sqrt{C_N}}\right) \times \left(\frac{5\times10^{64}\sqrt{A_m P_m}}{\sqrt{Q}}\right) \times \sqrt{\frac{300}{T}} \qquad (B)$$

حيث:

P_A= الهواء الأولى ، نسبة الهواء النظرى.

P= ضغط الغاز عند مدخل الثقب (سم ماء).

C_N = القيمة الحرارية الصافية للغاز كيلو كالورى / م^3 عند الضغط ودرجة الحرارة العادية (N).

A_m = متوسط مساحة أنبوب الخلط متر مربع = $\frac{A_2 + A_1}{2}$

A_1 = مساحة الزور (متر مربع).

A_2 = مساحة مخرج أنبوب الخلط (متر مربع).

A_P = المساحة الكلية للفتحة (متر مربع).

Q = معدل إدخال الحرارة كيلو كالورى / الساعة.

المصطلح الأول على الجانب الأيمن لهذه المعادلة هو دلالة لطبيعة الغاز وضغط الإمداد به. المصطلح الثانى هو دلالة لأبعاد الموقد. المصطلح الثالث يبين تأثير درجة حرارة الخليط.

طبيعة إستخدام الموقد ذات تأثير على متطلبات الهواء الأولى. عند السماح باللهب الطويل فى سخانات المياه، الأفران.... إلخ، يكون المطلوب فقط 35-40 ٪ من الهواء الأولى مع الغاز الطبيعي

ومعظم الغازات المصنعه وما لا يقل عن 55٪ مع غاز الإنتاج المسال (LPG). عندما يكون المطلوب لهب قصير (كما في حالة مجالات الطهى)، فإن متطلبات الهواء الأولى تكون أعلا . مجالات الطهى تحتاج 55-60٪، وسخانات الإشعاع تحتاج لا يقل عن 65٪.

يتم حساب المساحة الكلية للفتحه (الثقب) من بيانات تصميم معدل مدخلات الحرارة النوعية للموقد (حتى 6 مليون كيلو كالورى/ الساعة × متر مربع لمساحة القيمة).

بيانات تصميم أخرى هى:

مساحة الزور إلى المساحة الكلية للفتحة = 0.2 إلى 1.00.

مساحة فتحة دخول الهواء وإحكامه (Shutter) = 1.25 - 2.25 ضعف إجمالى مساحة الفتحة (الثقب).

لمسافة من فتحة الغاز إلى الزور = 0.5 إلى 2 ضعف قطر الزور .

طول أنبوب الخلط = 6 ضعف قطر الزور.

ميل أنبوب الخلط = 3°.

مساحة رأس الموقد = 1.5 -2 ضعف إجمالى مساحة الفتحه.

تصميم الموقد المهوى هو عموماً يتأثر بطبيعة الغاز. على الجانب الآخر طبيعة، وكمية الغازات المتاحة يمكن أن تتغير كثيراً. لذلك فإنه يكون من الضرورى معرفة أسس تعيين قابلية التبديل أو المبادلة (Inter change ability) للغازات.

معدل خرج طاقة الموقد طبقاً للمعادلة:

$$Q=\eta\times V\times C_N \qquad (C)$$

حيث:

η = معامل كفاءة الإحتراق.

جمع المعادلة (a)، (c) نحصل على:

$$Q\propto\frac{N}{\sqrt{S}}$$

كذلك من المعادلة (B) يكون لدينا الإمداد الأولى للهواء

$$P_A\propto\frac{1}{(\frac{C_N}{\sqrt{S}})\times 0.5} \qquad (D)$$

النسبة $C_N/\sqrt{S}$ تعرف بمؤشر ووبى (Wobbe Index). وهنا معيار مفيد فى تقدير القدرة على تغير الغازات بالنسبة للمواقد المهواه. وهى كمية بعديه (Dimential) ذات أبعاد للقيمة الحرارية للغازات.

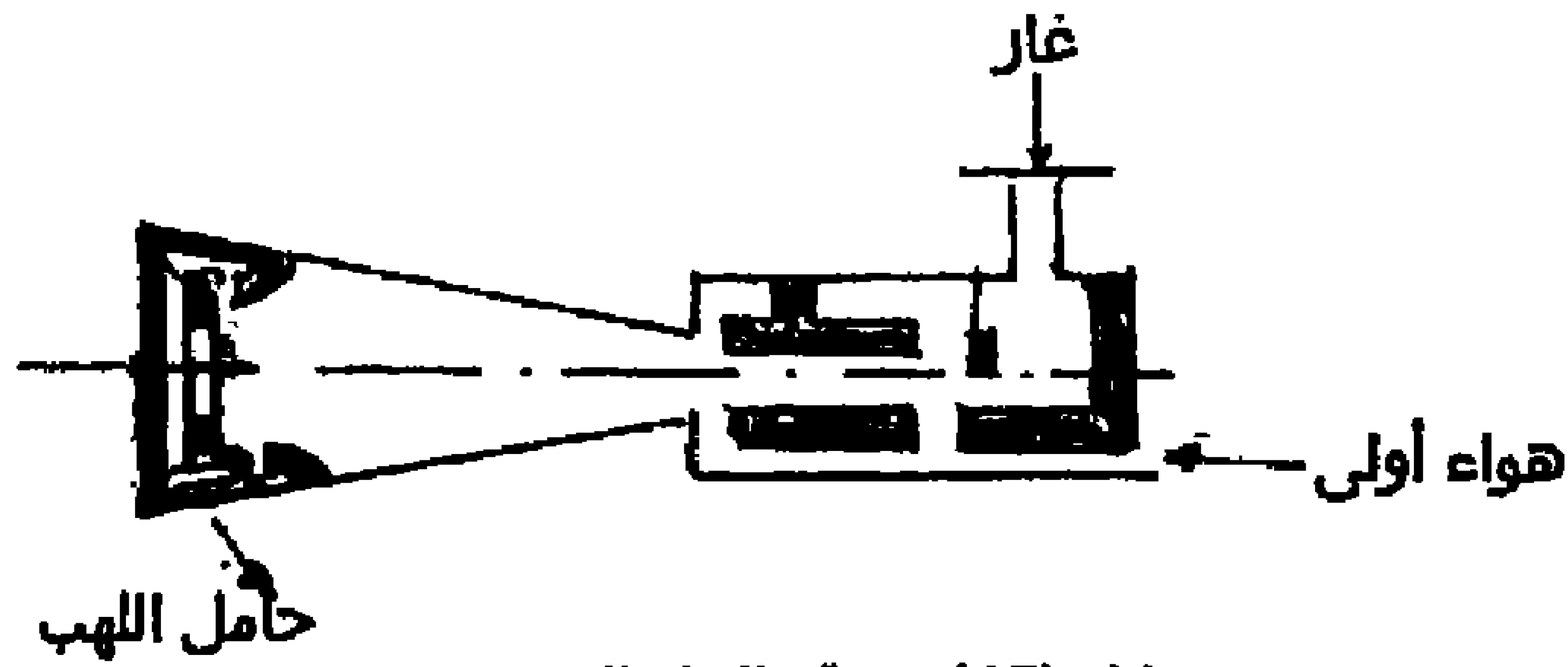
مؤشر ووبى (Wobbe Index) له أهمية كبيرة للغازات التى يتم إمدادها خلال نظام توزيع خط المواسير ذلك لأن المواقد المهواه مستخدمه على نطاق واسع. هذا المعيار له أهميه محدودة بالنسبة للأنواع الأخرى من المواقد.

موقد إختبار التهوية (An Aeration Test Burner) تم توصيفه لتقدير التغير فى نوعية الغاز. وهو موقد تكلو(Teclu) بإرتفاع 30.5سم وقطر داخلي 10.26سم وله وصله ملولبه الطرفين (Nipple) بقطر 0.99 مليميتر. مغلاق الهواء بالغطاء المتحرك (Air Shutter) يكون مستطيلاً ويتم ضبطه برأس ميكرومتريه. الغاز المعطى يتم حرقه فيها. وهى تهدف إلى تعيين مدى فتحة مغلاق الهواء التى عندها يتم الحصول على المخروط الصحيح والذى له إرتفاع 6.35 سم. النتيجة تقدر بموقد إختبار التهوية (ATB) Aeration Test Burner). التغير لـ5 وحدات فى عدد (ATB) للغاز يمكن أن يؤثر بشدة على كفاءة الموقد المهوى.

أقصى مدخلات للحرارة يمكن الحصول عليها بالمواقد المهواه من نوع الضغط المنخفض للغاز موضحه فى الجدول التالى:

نوع الغاز	أقصى معدل دخول الطاقة × 10^3 كيلو كالورى على الساعة × متر مربع من مساحة الفتحة - الهواء الأولى 40	55	70	مؤشر ووبي ($C_N/\sqrt{S}$)
غاز فرن الكوك	20400	11.800	7.500	8.100
الغاز الطبيعي	12100	7.100	4.700	11.800
غاز الإنتاج المسال (LPG)	لهب أصفر	8.200	5.100	21.200

موقد الغاز المهوى من نوع أداة سحب غاز الضغط العالى تحدث خلط أفضل وإحكام للغاز والهواء باستخدام سحب الغاز فى مرحلتين (Two stage Aspiration) عند الفتحة والموقد كما فى الشكل رقم (45).



شكل (45): موقد الغاز المهوى
ذو مرحلتين من المص وحامل اللهب

ماسك اللهب المجهز عند طرف الموقد يثبت اللهب بالمحافظة على منطقة ذات سرعة غاز منخفضة نسبياً عندما يكون ضغط الغاز فى الخط مرتفع.

فى نوع موقد الضغط المهوى (الموقد اللافح) فإن كلا من الغاز والهواء يتم إمدادهم عند الضغط المرتفع. هنا، تستخدم نافورات الهواء والغاز الأولى متحدة المركز (Concentric) تحت الضغط بدلاً من نافورة الغاز المنفردة. تستخدم نافورات منفصله لحث الهواء الثنائى أو يمكن تغذيتهم أولاً إلى غرفة الخلط. الأفران الضخمه يتم تسخينها بواسطة عدة مجموعات من نافورات الغاز فى رأس مشتركه، كل نافورة تكون محاطه بالهواء المضغوط بواسطة فتحة متحدة المركز للامداد بالهواء الثنائى. عند إمداد الهواء تحت ضغط يتم الحصول على إحكام الموقد بضبط ضغط الهواء.

فى نوع الموقد السابق الخلط، لا يتم التسخين المسبق للهواء الأولى إلى درجة حرارة تزيد عن درجة حرارة الإشتعال للغاز، ذلك لعدم حدوث بدايه إحتراق للغاز قبل دخوله الفرن وإحتمال حدوث إنفجار.

الغازات ذات القيمة الحرارية المنخفضة (مثل غاز الفرن العالى) بسبب إنخفاض سرعة اللهب لهذه الغازات فإنه من السهل نفخه من طرف الموقد بالهواء الأولى. إذا أعطى ذلك حركه دورانيه قويه (دواميه) فإن اللهب يصبح أكثر ثباتاً. بالمثل، مع الغازات ذات قيمة حرارية عاليه، لإن الدوامه الهوائية تقصر اللهب وتوفر إحكام أفضل. سرعة اللهب للهيدروجين مرتفعه جداً. لذلك فإن نسبته فى الوقود الغاز تؤثر بدرجة كبيرة على سرعة اللهب وثبات اللهب. أقصى كمية مسموح بها من الهواء الأولى تقل مع زيادة المحتوى من الهيدروجين. كذلك مجال ثابت اللهب يتغير بنفس الطريقة. هذا المجال هو الذى يبين أدنى معدل لإمداد الغاز لمنع إرتداد اللهب للموقد وأقصى معدل مسموح به قبل نفخ اللهب من طرف الموقد. هذه النسب ما بين أقصى خرج إلى أدنى خرج للموقد تسمى نسبة الرجوع للموقد (Turn Down Ratio) والتى هى 5 :1 لمعظم غازات الإشعال للأفران.

المواقد من نوع الخلط الداخلى تكون محدودة بحجم الموقد الذى يمكن توصيله بلهب ثابت وبحقيقة أن الهواء أو الغاز السابق تسخينه إلى ما بعد درجة حرارة الإشتعال للغاز لا يمكن إستخدامه بسبب الإشتعال المسبق والإنفجار.

فى المواقد من نوع الخلط الخارجى (تسرب اللهب) يحدث إحتراق عندما يسمح للغاز بالإحتراق عند فتحة بالهواء المحيط (مثل اللهب المضئ لموقد بنزن مع قفل محبس الهواء) أو عند مرور تدفقات الهواء والغاز فى الفرن، أما بالتوازى أو بتدفقات تصادميه.

فى موقد النافورة يتم حقن الغاز إلى فضاء الفرن خلال شق ذو شكل خاص الذى ينتج نافورة مضطربه من الغاز والتى بالتالى تصاحب الهواء فى إطار التدفق المحدد بواسطة السطح الأمامى للموقد. هذه المواقد قد تصنع من السيراميك وهى تنتج لهب مستوى (مثل أجنحه الخفاش) . كل الهواء المستخدم هنا يأتى من الجو خارج الموقد خلال فتحات مجاورة للتصريف. عندما يكون معدل التدفق الحجمى للغاز مرتفعاً، يحدث الإحتراق فوق فضاء كبير ويلزم بعض الوقت لإكمال الإحتراق للوقود (كما فى حالة الغاز الضعيف)، المواقد يمكن أن تكون ببساطه ذات نهايات مفتوحه للمواسير الحاملة للغاز إلى الفرن على طول مواسير أضخم حامله للهواء السابق تسخينه. اللهب الناتج يسمى لهب التسرب لأن الهواء والغاز يتسرب كل منهما فى الآخر قبل الإحتراق. فى الحقيقة، هذا التسرب ينتج من الإضطراب الناتج والذى يمكن زيادته بالآتى:

- الإختلاف فى سرعات تدفق الغاز والهواء.
- الإختلاف فى إتجاه تدفقات الغاز والهواء.
- الإختلاف فى كثافات تدفقات الغاز والهواء، إذا كان الأثقل عند القمه.

كلما كانت هذه الإختلافات كبيرة كلما كان الإحتراق أسرع والحصول على لهب أسخن.

زيادة الهواء تعجل الإحتراق، كما يفعل زيادة الإضطراب بالعوائق.

زيادة الهواء الغنى بالأكسجين أو استخدام الأكسجين النقى يزيد من معدل تفاعل الإحتراق ودرجة حرارة اللهب.

تصميم الموقد يجب أن يكون بحيث يمكن إنتاج لهب قصير ساخن أو لهب طويل بارد ذو طاقة متجانسة خلال مساحة متسعه طبقاً لمتطلبات معينه.

التطوير الحديث فى تصميم الموقد :

سيتم وصف التطوير الحديث للمواقد المستخدمة فى التسخين الصناعى:

1. التسخين الإشعاعي : (Radiation Heating)

التسخين الإشعاعي يتم اللجؤ إليه عند تسخين سطح مستوى رقيق للمادة أو عندما تكون المادة موصل جيد للحرارة أو عندما يكون من السهل إحاطتها بأسطح موازيه مشعه. التسخين الإشعاعي ذاتي الإنتشار، لذلك يوفر توزيع متجانس للحرارة على السطح.

لتنفيذ نفس التجانس بالتسخين بالحمل الحراري (Convection Heating) يتطلب صف من النافورات عاليه السرعة حيث الموقد المشع من نوع التوزيع الفردى يمكنه عمل المهمه المكافئة باستثمار معده أقل كثيراً. رغم أن معظم التسخين الإشعاعي والتسخين بتصادم النافورة يتطلب مصادر حرارة محيطة، فإن نوع الإشعاع يكون إلى حد ما متعدد الإستعمالات كثيراً فى مختلف الأحمال.

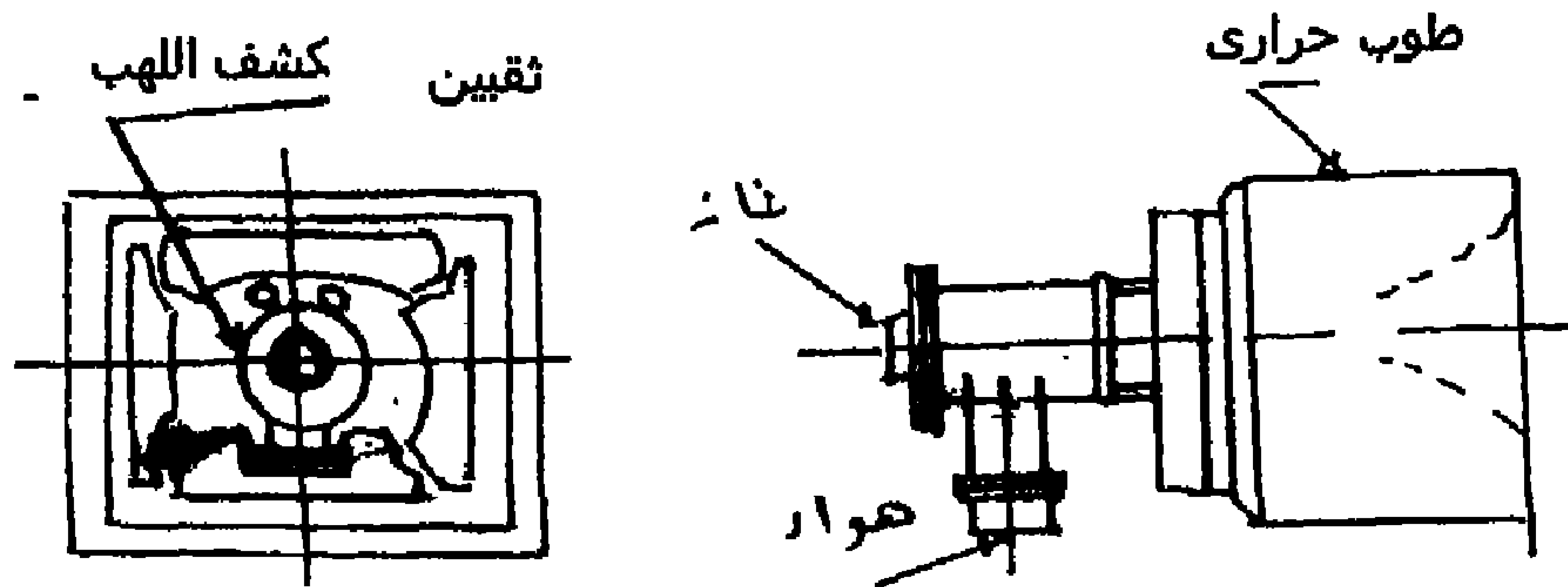
نوع الإنتشار للهب الإشعاع يفضل كثيراً عن تسخين وعاء محتوياً حمل ثمين أو وعاء يكون هو نفسه ثميناً وحيث تصادم اللهب عليه سوف يسبب نقط ساخنه محليه والتى تقصر من عمره. الإمساك بالحرارة (Holding Heat) للسائل فى أوعية معزولة هو أفضل تطبيق بالإشعاع لأن الفقد الرئيسي فى الحرارة يكون من سطح السائل والحرارة تكون ببساطة موازنه أى فقد من السطح. من وجهه نظر الإنتقال الحرارى، فإن السطح عندئذ يكون مثل مسطح رقيق مستوى من المادة الصلبة.

مواقد الإشعاع: (Radiation Burners)

مواقد الإشعاع تسخن الحمل أساساً بالإشعاع. إما بواسطة اللهب الطويل المضئ أو بالإنتقال بالحمل الحرارى إلى السطح الذى يصبح باعثاً للإشعاع. ثم تطوير تلك خاصة للأفران حيث الإشعاع هو المصدر الأول للإنتقال الحرارة.

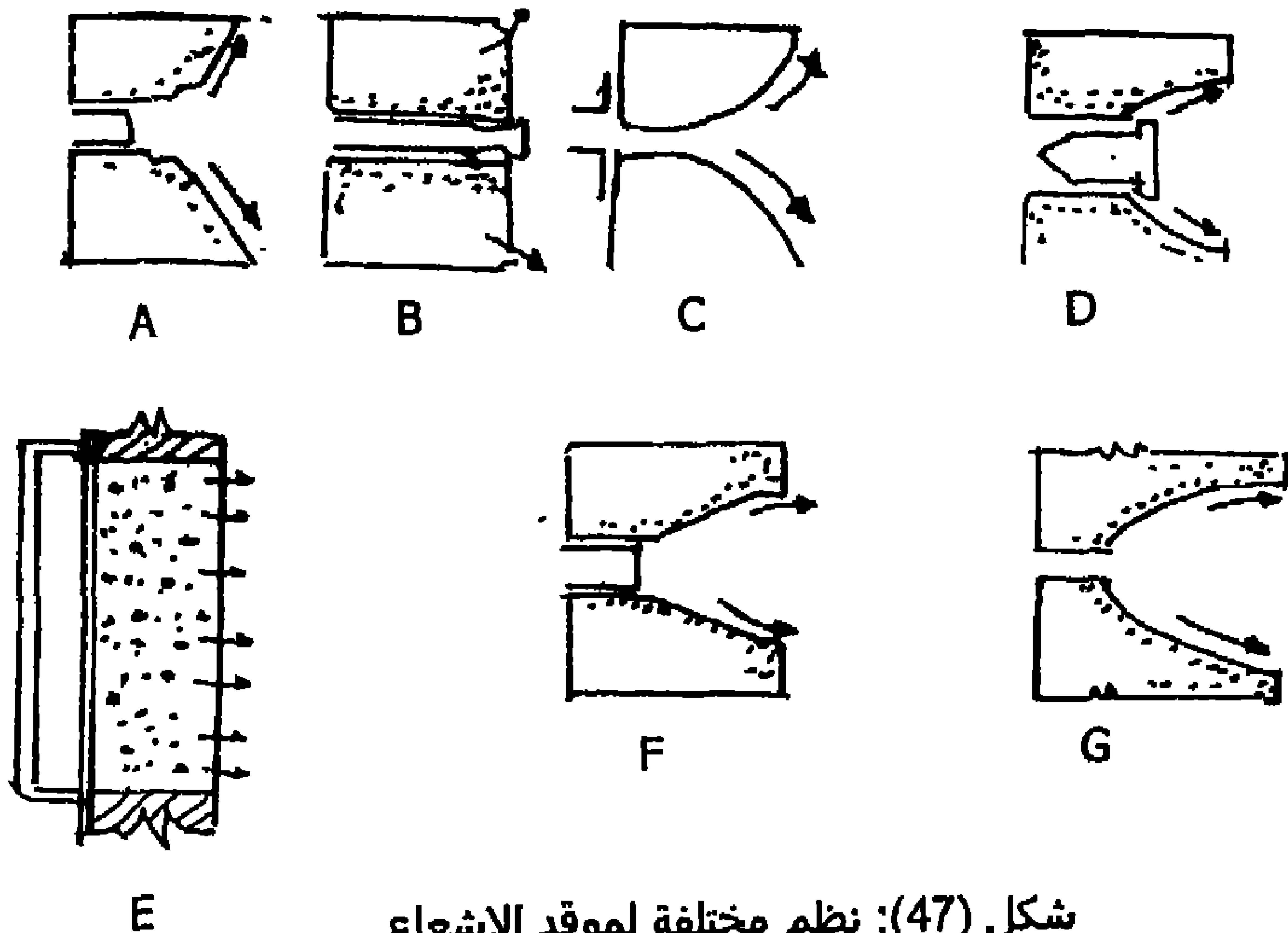
2. مواقد اللهب المستوى : (Flat Flame Burners)

حيث يلزم تجنب الإحتراق أو الدفع الأمامى باللهب وغازات الإحتراق الساخنه أو عند الحاجة إلى تعزيز الإنتقال الحرارى بالإشعاع، فإنه يتم إستخدام مواقد اللهب المستوى والتى تقوم بالتسخين الحقيقي ببطانتها الحرارية والسطح الحرارى لحائط الفرن المحيط أو السقف بالحمل الحرارى من السرعة العاليه للغازات العادمة التى تقذف إلى ألأجناب من الموقد. عندئذ تقوم الأسطح الحرارية الساخنه بإشعاع الحرارة إلى الحمل. اللهب فى شكل القرص المنتج بواسطة هذه المواقد ليس له سرعة أماميه. وهو موضح فى الشكل (46).



شكل(46): موقد الغاز باللهب المستوى

الشكل رقم (47) يوضح مخططات للعديد من الأشكال الحرارية المتاحه تجارياً لمواقد اللهب المستوى. النموذج (a)، (b)، (c)، (F) هى الخلط بالفنيه (Nozzle Mix)، (b)، (d)، (e) هى الخلط المسبق (Pre Mix). النموذج (e) يستخدم غشاؤ حرارى مثقب. النموذج (g) يصمم لتركيز الإشعاع فى نقط ساخنه مستهدفه. الكل بإستثناء (e) تستخدم تأثير كوندا (Conda Effect).

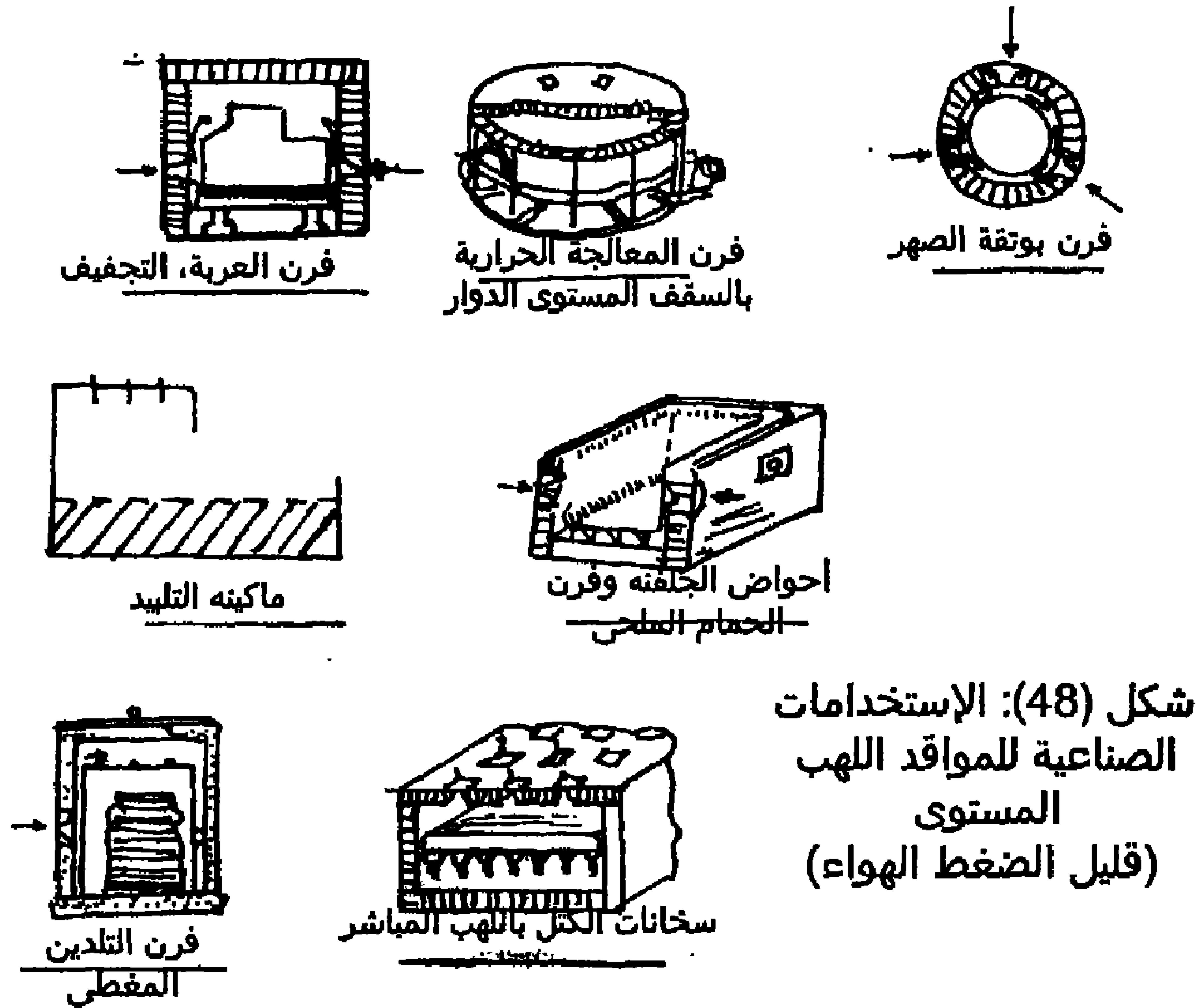


شكل (47): نظم مختلفة لموقد الإشعاع باللهب المستوى

تأثير كوندا هو إستعداد المائع الخارج من النافورة ليتبع كنتور الجدار حتى فى حالة إنحناء الجدار يكون بعيداً عن محور النافورة. تأثير كوندا هذا المستخدم فى أنواع عديدة من مواقد

الإشعاع يميل إلى إعاقة إنتاجيه الترزيز الجيد بالطرق العادية. لذلك فإن تلك المواقد تكون مناسبة أكثر للوقود الغازى.

مواقد الوقود المزدوج متاحه عموماً فقط للوقود من الغاز والزيت الخفيف. الشكل (48) يوضح إستخدامات مواقد اللهب المستوى.



شكل (48): الإستخدامات الصناعية للمواقد اللهب المستوى (قليل الضغط الهواء)

3.مواقد الأنبوب المشع: Radiant Tube Burners

هذه المواقد ليست تحشد فقط اللهب إلى مقطع محصور جداً وتحتاج إلى إطار طويل لإطلاق الحرارة، ولكنها غرف محكمه وعند البدء تكون غرف باردة. عند العمل بالغاز فإن مواقد الأنبوب المشع لها مظاهر الإعاقة والخلط الجزئى المسبق الذى يوفر إنطلاق متجانس للحرارة على إمتداد الطول الكلى للأنبوب. الشكل الفريد لدخول الهواء الدوامى يسبب تغطيه الجدار الداخلى للأنبوب بالهواء وحماية الأنبوب من التسخين الزائد فى المنطقة حيث الكثافة العاليه للهب. مع تشتت طاقة الدوامه فإن كلا من الهواء ومبخر الوقود الذى لم يحترق يتسرب معاً منتجاً إطار إطلاق الحرارة الطويل المطلوب.

4. مواقد الخلط المؤجل: Delayed Mixing Burners

فى بعض العمليات يكون المطلوب الإشعاع المباشر فوق مساحة كبيرة. هذه هى أحياناً الحالة فى الأفران المتسعه وذات الطول الكبير حيث التوزيع الضعيف للحرارة أى أنه يتم الحصول على نقط ساخنه ونقط باردة من اللهب التقليدي القصير النقى أو حيث كل المواقد يجب وضعها عند نهاية واحدة. اللهب المضئ له طول كبير ويمكنه ملأ حجم كبير من فضاء الإحتراق بلهب ذو تغيرات قليلة فى درجة الحرارة على مسار طولها. هذا يحقق استخدام كفؤ أكبر لمساحة المجمرة.

تلك المواقد تصمم ليكون لها معدل خلط منخفض جداً للوقود والهواء بحيث أن كلا المائعين (2 Fluids) يسيرا مسافة كبيرة من الموقد قبل الخلط الكامل والحرق. اللهب عندئذ يسمى لهب التسرب (Diffusion Flame) لأن الخلط يحدث عند تسرب كلا من التدفقات الموازيه الرقائقية للهواء والسائل كلا منهما فى الأخر. التسخين الشديد للوقود فى عدم وجود الهواء يسبب التكسير الحرارى لجزيئات الوقود إلى جزيئات خفيفه وثقيله– تلك الجزيئات تصبح جسيمات من السناج فى حجم الميكرون. تلك الجسيمات المعتمه تمتص الحرارة من اللهب، وتصبح مضيئة وتبعث طاقة حرارية وبالتالى كان الإسم المواقد ذات اللهب الطويل المضئ.
(Long Luminous Flame Burners).

5. التسخين بالحمل الحرارى : (Convection Heating)

التسخين بالحمل الحرارى بموقد اللهب الحديث بالسرعة الأمامية هى الأفضل والمناسب للإستخدام المتضمن تسخين الشحنات ذات الأكوام المستهلكه، التسخين بالتصادم، والإنتقال للكتلة، والتسخين المباشر بالهواء الملتهب. الحمل الحرارى له ميزه الإحتراق المباشر نحو فتحات ضيقه وعميقه.

تيارات الحمل الحرارى يمكن نثرها(Splashed Around) داخل مغلق حيث الإشعاع يمكنه فقط السير فى خطوط مستقيمة. الحمل الحرارى يمكن إستخدامه كعامل نقل كتلة (Mass Transfer Agent) حيث يوفر مجال لحمل الأبخرة بعيداً، الأكاسيد والغازات الأخرى بعملية التسخين. فى حالة عدم حمل تلك الأبخرة أو مواد التفاعل بعيداً فإن وجودها قد يؤخر العملية.

التسخين بالحمل الحرارى يمكن إيقافه فوراً إذا كان هناك توقف فى مكان آخر فى العملية المستمرة.

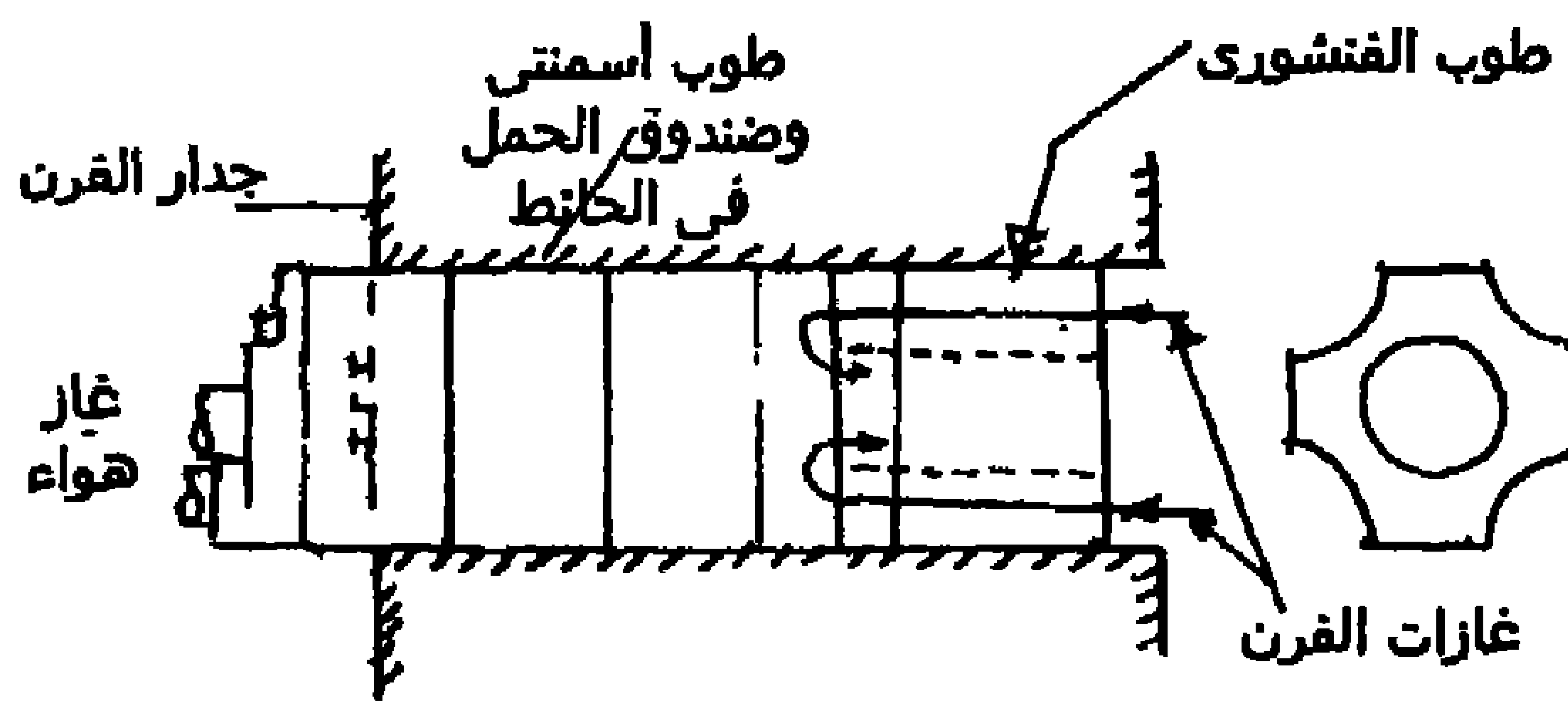
بالمقارنة التسخين بالإشعاع الحرارى يمكن أن يحقق تخزين حرارة كبيرة فى مصدر الإشعاع، وهذه الحرارة قد تستمر لتصب فى الحمل حتى بعد إنطفاء اللهب.

إذا كان الحمل الكلى له مقطع سميك ولكن مفتوح لتمكين التدوير بين أجزاؤه، كما في حالة الطوب في الفرن النفقى (Tunnel Kiln)، السجار السيراميكي (Sagars). غلاف صندوقى صلصالى تنضد فيه الخزفيات)، أكوام للمسبوكات الغير منتظمة، اللهب ذو السرعة العالية الأمامية يمكن عادة توجيهه خلال أنفاق مفتوحة من أعلا أو منظمة للإحتراق خلال القطع الكثيرة من الحمل الكثيف المتسع.

أصعب عملية تسخين هى عندما يكون الحمل له مقطع سميك ويكون صلباً بحيث أن الغازات الساخنه لا يمكنها الدوران خلاله. لا الإشعاع ولا الحمل الحرارى يمكنه توصيل الحرارة إلى داخل الكتله. فى مثل هذه الحالات يمكن الإعتماد على التوصيل الحرارى لنشر الحرارة إلى مركز الحمل. هذه العملية تسمى التشرب أو الإنتفاخ (Soaking).

6. المواقد عاليه السرعة: (High Velocity Burners)

المواقد عاليه السرعة تضمن السرعة العالية والخلط المتقن للوقود والهواء وتستخدم مع قرميد خاص له فتحة إختناق عند جانب الصرف بما ينتج عنه خروج اللهب والغازات العادمة بسرعة عاليه جداً (350 كيلومتر/الساعة). وهى تزيد من الإنتقال الحرارى المؤثر بصرف النظر عن مستوى درجة الحرارة أو التحميل فى الفرن. الإنتقال الحرارى المؤثر يمكنه أولا تسخين الحوائط الحرارية وكذلك الحمل بما ينتج عنه تسخين إشعاعى كبير. إستخدام نافورات ذات السرعة العالية يساعد فى معدلات زيادة سرعة الإنتقال الحرارى وتحقيق أفضل تجانس لدرجة الحرارة. وهذا موضح فى الشكل رقم (49).



شكل (49): موقد عالى السرعة بالفنشورى
من الحراريات موضحًا إعادة التدوير لغاز الفرن

المواقد عاليه السرعة تم إستخدامها بنجاح في أفران المعالجة الحرارية. نافورات اللهب لها سرعة عاليه حيث تحمل مثل الباثقات (Ejectors) أو كحاقن (Aspirator) حيث تدفع الغازات المحيطة إلى تدفقاتها (Their Streams) وبذا إحداث إعادة تدوير قوية لغازات الفرن

حول كل الحمل. فى معظم الغازات الصناعية، كمية تدوير الغاز تحدد كلا من سرعة التسخين وتجانس درجة الحرارة.

عندما يكون الوقود رخيصاً، فإن الهواء الزائد يمكن إستخدامه للمساعد فى تجانس درجة الحرارة بالآتى:

- خفض درجة حرارة الخلط الساخن.
- منع حدوث التطبق (تكون الطبقات).
- تعزيز الإنتقال الحرارى المؤثر.

بالنسبة للمواقد الحديثة ذات السرعة العالية التى تستحث إعادة التدوير لغازات الفرن، فإن الغازات المعاد تدويدها تحقق الفوائد الثلاث السابقة، وبذا عدم إستخدام هواء زائد ولذلك خسارة فى الوقود إعادة تدوير الغاز فى الافران ذات درجة حرارة منخفضة والمجففات (Dryers) يمكن توفيره بمروحة إعادة التدوير. ولكن، المراوح فى الأفران ذات درجة الحرارة العالية ممنوعة للتكلفة العالية مع صعوبة أو إستحالة الصيانة. المواقد عاليه السرعة يمكنها خلق إعادة تدوير فى الفرن نفسه بدون إستخدام مروحة لإعادة التدوير.

فى أفران الصهر الغير حديدية يتم تجميع الشحنة عالية. فى مثل هذه التطبيقات فإن المواقد عاليه السرعة تنتج فى ثقب والإحتراق خلال تلك الكومات باستخدام الحمل الحرارى (Convection) لصهر الحمل الكلى مرة واحدة بدلاً من العمل عند القطع الخارجية فقط. فائدة أخرى تأتى من الإحتراق السريع ومن حقيقة أن طرطشة المعدن المنصهر يمكن أن يحدث إنسداد الفتحات الصغيرة فى القرميد الحرارى للمواقد عالية السرعة.

التسخين المسبق للخردة هو إستخدام آخر لفائدة الإحتراق للمواقد عاليه السرعة، وخاصة فى أوعية الخردة العميقة.

المهام التى يمكن أن تقوم بها المواقد عالية السرعة بطريقة جيدة هى الإختراق (Piercing)، الوصول (Reaching)، التجريد (Stripping)، التسخين الهوائى (Air Heating).

تصميم المواقد لإستعادة الفقد الحرارى :

Burner Design For Waste Heat Recovery

الأفران الصناعية التقليدية تستهلك نواتج الإحتراق عند درجات حرارة أعلا من درجة حرارة الفرن . هذه الغازات العادمة تحتوى على حرارة محسوسة كبيرة. كمية الحرارة المفقودة خلال

الغازات العادمة ومحصلة كفاءة الفرن تختلف طبقاً لدرجة حرارة الغاز العادم. إرتفاع درجة حرارة غاز العادم من الفرن، يزيد من الفقد الحرارى خلال المدخنه. الطريقة المستخدمة لإنقاذ الحرارة المحسوسه من الغازات العادمة هى باستخدام المبادل الحرارى (المسترجع للإستفادة من حرارة الفرن العادمة – Recuperator) وذلك للتسخين المسبق لهواء الإحتراق والذى يرفع كفاءة الوقود. إستخدام هواء إحتراق سبق تسخينه ينتج عنه زيادة فى درجة حرارة اللهب ولذلك إشعاع أفضل.

المواقد المصممه للعمل بالهواء السابق تسخينه قد تتطلب:

- بطانة حرارية للعزل لحماية المادة من إرتفاع درجة الحرارة ولخفض الفقد الحرارى.
- سبيكة خاصة أو مواد حرارية للمكونات الداخلية لمنع الترسيب والتشويه الذى يمكن أن يؤثر على الكفاءة والطاقة.
- الحماية المعزولة للمهمات المساعدة مثل أدوات ضبط الأداء، إحكام اللهب؛ فتحات الملاحظة والمحابس
- الحجم المناسب للموقد بسبب إختلاف كثافة الهواء والتى يمكن أن تكون معقدة إلى حد ما عندما يكون كل تشعبها خلال النظام الكامل قد تم أخذه فى الإعتبار.

الهواء الأولى للترزيز طبيعي لا يتم تسخينه المسبق، نظراً لأن مثل هذه المواقد مصمم للإستخدام مع هواء الإحتراق السابق تسخينه، فيجب أن يكون لها أدنى نسبة من هواء الترزيز.

موقد الإسترجاع الذاتى للإستفادة من حرارة الفرن العادمة:

Self Recuperative Burner :

كما هو موضح من العنوان، فإن مواقد الإسترجاع الذاتى للإستفادة من حرارة الفرن العادمة لها مبادل حرارة منشأ فيها (Built in) للتسخين المسبق لهواء الإحتراق. تكامل المبادل الحرارى مع الموقد يوفر كثيراً من عيوب تجهيزات إستعادة الحرارة الخارجية. فى حالة المبادلات الحرارية الخارجية، فإن نواتج الإحتراق يتم تدويرها خلالهم مع نتيجة للفقد الحرارى وتكلفة التوصيلات للمواسير. المبادل الحرارى الخارجى بما يصاحبه من أعمال المواسير يمكن أن يكون غير مفيد خاصة فى حالة أفران الدفعة الواحدة (Batch Type) .

فى موقد الإسترجاع الذاتى للإستفادة من الحرارة العادمة يتم التسخين المسبق لهواء الإحتراق خلال الموقد نفسه بواسطة الغازات العادمة التى تمر ثانياً خلال الموقد مع تركها الفرن. أنبوب

دائرى يفصل هواء الإحتراق من الغازات العادمة. كلا من هواء الإحتراق والغاز العادم يمر خلال حلقة ضيقة، الهواء يتدفق على الداخل. المبادل الحرارى هو مكمل ومباشرة خلف فنية الموقد والنفق، الطرف الأمامى لأنبوب الهواء محتجزاً نفق الموقد الحرارى. الوقود يتدفق إلى فنيه الموقد خلال أنبوب داخلى ذو مركز واحد (Concentric) مع أنبوب الهواء.

الغاز العادم تتم إزالته بعد إستخلاص الحرارة المفيدة بواسطة نظام إستخراج الغاز.

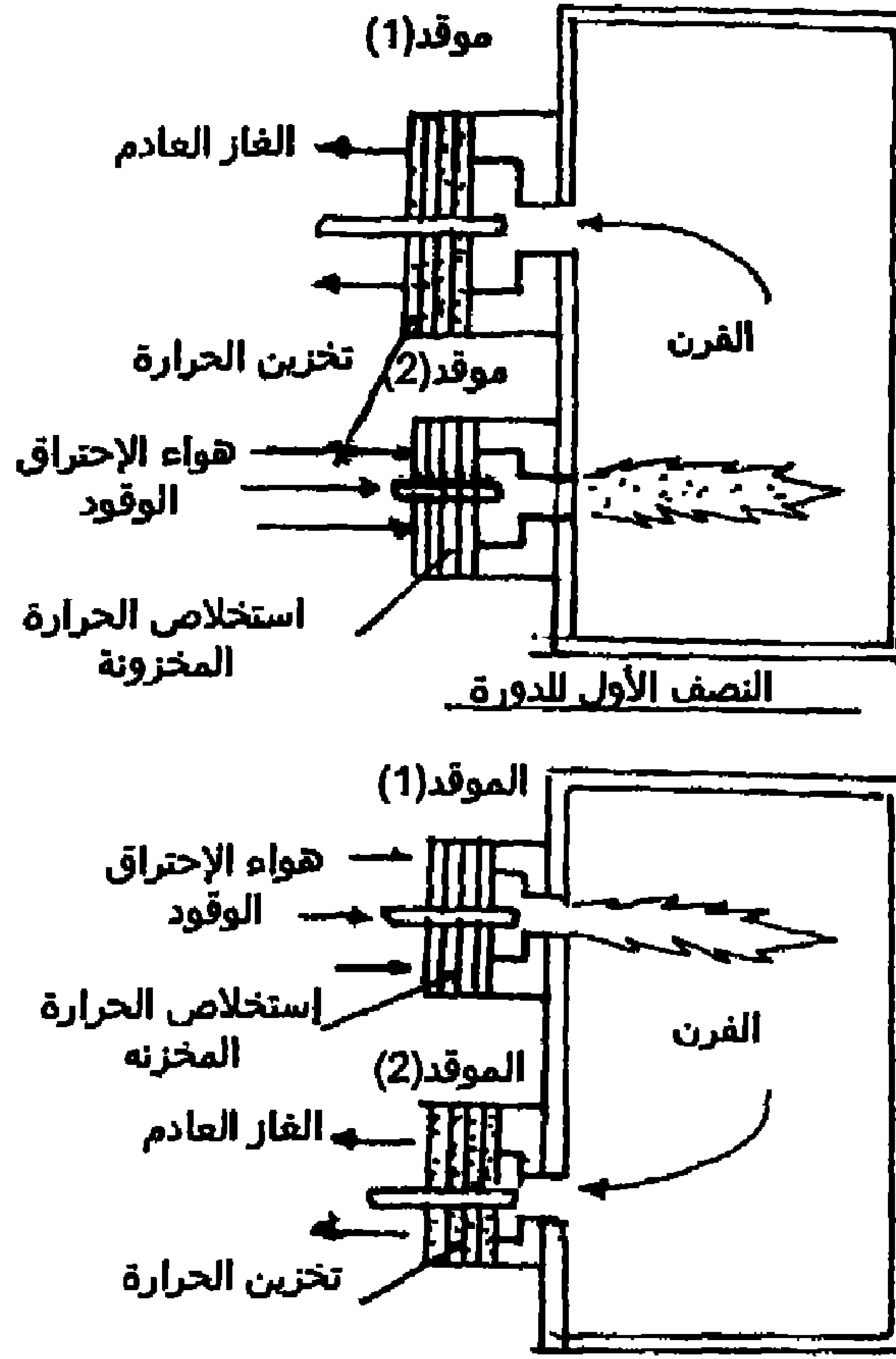
نظام الطبقة المزدوجة لأسترداد الطاقة :

Twin Bed Reclamations System.

مواقد إسترداد الحرارة بالطبقة المزدوجة هى أحدث تطوير فى تصميم المواقد بإستخدام الحرارة المفقودة فى الغاز العادم للتسخين المسبق لهواء الإحتراق. وهى تستخدم مبدأ التجديد لتوفير إنقاذ الوقود من الإستهلاك. إستخدام المجددات الخارجية التقليدية أصبح محدوداً بسبب الحجم والتكاليف الأولية العاليه.

الطبقة المزدوجة توضع دائماً فى أزواج (Pairs). حيث يكون واحد فى الإشتعال، فإن توأمة يعمل لإستخلاص الحرارة العادمة وطبقة تخزين الحرارة. كل موقد يحتوى طبقة من مادة تخزين الحرارة التى تستخلص الحرارة من الغاز العادم. التدفقات كل 20 إلى 30 ثانية يتم عكسها (Reversed). هواء الإحتراق البارد يدتفق خلال طبقة إسترداد الحرارة المفقودة ويتم تسخينه إلى خلال 90°م لحرارة الفرن. الموقد الذى تم إشعاله يعمل الآن كمستخلص للبخار العادم وطبقة تخزين.

درجات حرارة العادم يتم خفضها إلى أعلا من درجة حرارة نقطة الندى تماماً، والتى ليست فقط تدل على كفاءة الوقود العاليه ولكن تسمح كذلك بإستخدام مروحة تيار السحب المستحث (Induced Draft Fan) أو فنشورى الإستخراج (Standard Eductors) ذو مواد قياسية منخفضة السعر. درجات حرارة التسخين المسبق للهواء تنتج درجات حرارة للهب مرتفعة جداً، الإنتقال الناتج يكون عظيماً. نظام الموقد هذا موضح فى الشكل (50).



شكل (50): مبدأ إستخلاص الحرارة بالطبقة المزدوجة

درجة حرارة الهواء المرتفعة جداً تسبب حدوث تكسير لمعظم الوقود، والذى يحول اللهب إلى المضئ وبالتالى يعزز الإشعاع.

من بين المميزات العديدة لنظام إستعادة الحرارة الفاقدة فإنه يمكن من إستخدام الهواء الزائد بدون تعرض الكفاءة لسلبيات الهواء الزائد الملزم مع مواقد الهواء البارد. فى حالة موقد الهواء البارد الذى يعمل عند حالة الهواء الزائد، فإنه يجب حرق الوقود الزائد لتسخين كل متر مكعب من الهواء الزائد إلى درجة حرارة الفرن. نظام إستعادة الحرارة الفاقدة يسخن الهواء الزائد بالحرارة المختزنة فى الطبقة – وليس بالوقود.

مواقد إستعادة الحرارة الفاقدة ذات الطبقة المزدوجة (التوأم) يمكن إستخدامها فى العديد من الأفران. مثل قمين أو تنور المكوك (Shuttle Kiln) ، أو الرفع ، سخانات المغرفة، الدافع المستمر فى الفرن، فرن التلدين المستمر، الصهر المعدنى باللهب الغير مباشر ، فرن الجلفنه، وأفران اللفح

4

الفصل الرابع

حسابات الإحتراق

Combustion Calculations

1. معادلات الإحتراق

الجدول التالى يحتوى على الأوزان الذرية والأوزان الجزيئية (Atomic And Molecular Weights) لبعض العناصر والمركبات المستخدمة عادة فى العمليات الهندسية للإحتراق.

المادة	الوزن الذرى	الوزن الجزيئ
كربون (C)	12	12
كبريت (S)	32	32
هيدروجين (H_2)	1	2
أكسجين (O_2)	16	32
نيتروجين (N_2)	14	28
ثانى أكسيد الكربون (CO_2)	–	44
بخار الماء (H_2O)	–	18
ثانى أكسيد الكبريت (SO_2)	–	65
الميثان (CH_4)	–	16
الإيثيلين (C_2H_4)	–	28
الهواء	–	29
أول أكسيد الكربون (CO)	–	28

أ. الإحتراق الكامل: (Complete Combustion)

الإحتراق تفاعل كيماوى بين الوقود والمؤكسد والذى يتقدم فوق بعض من أدنى درجة الحرارة المسماه درجة حرارة الإشتعال التلقائى الذى يجب تسخين مواد التفاعل إلى درجة الحرارة تلك. فى إحتراق الغازات والأبخرة فإن نسب الوقود والمؤكسد يجب أن تكون ما بين حدود القابلية للإشتعال، وتتغير مع وقود معين، مؤكسد، مخفف، إتجاه إمتداد اللهب، الضغط، درجة الحرارة، ووجود عامل وسيط.. إلخ. عند إحتراق كل أنواع الوقود يكون المطلوب معرفة النسب التكافؤية أى كمية المؤكسد التى عند إكتمال الإحتراق بكمية معينة من الوقود سوف تؤدى إلى منتجات مثل ثانى أكسيد الكربون (CO_2) ماء (H_2O) ثانى أكسيد الكبريت (SO_2)، نيتروجين (N_2)، هذا المفهوم المثالى هو أساس كل حسابات الإحتراق.

معظم أنواع الوقود من الهيدروكربونات بها مكونات نشطة من العناصر مثل الكربون (C)، الهيدروجين (H)، الأكسجين (O)، النيتروجين (N)، الكبريت (S). التفهم للتفاعلات الكيماوية الأساسية التى تتضمن تلك العناصر يعتبر أساسى لكثير من العمليات التطبيقية فى إحتراق معظم الوقود الصلب، السائل ، الغازى. المكونات الخاملة عادة تلاحظ فى الوقود فى شكل رطوبة ورماد، الأخير يعتبر مخلفات غير عضوية بعد إحتراق الوقود فى الهواء أو الأكسجين إلى كتلة ثابتة عند درجة حرارة حوالى 800°م. الوقود الغازى قد يحتوى على أبخرة غازية، ثانى أكسيد الكربون، أو نيتروجين والتى هى مخففات (Diluents) والتى تزيد حجم نواتج الإحتراق وتقلل من أقصى درجة حرارة يمكن الحصول عليها.

عموماً الإحتراق يتطلب التفاعل مع الأكسجين أو معين للإحتراق. الاكسجين هو المؤكسد الرئيسي، ولكن الهالوجينات (الكلوروالفلور)، ثانى أكسيد الهيدروجين وكذلك حامض النيتريك، يمكن أن تعمل تلك المؤكسدات كما فى حالة قذف الصواريخ.

الهواء هو المؤكسد العادى ذلك لكونه رخيص ومتاح بسرعة.

مكونات الهواء الجاف النموذجية حيث نسبة الحجم ٪ هى:

% 78.09 = N_2	% 20.95 = O_2 ،	% 0.93 = Ar ،
% 0.03 = CO_2	%0.0018 = Ne ،	%0.005 = He ،
%0.002 = CH_4	% 0.0001 = Kr ،	%0.00005 = NO،
%0.00005 = H_2	%0.00004 = O_3 ،	% 0.000008=Xe،

هذا التكوين يتغير مع الإرتفاع وقليلاً بالتلوث الصناعى. طبقاً للمتعارف عليه فإن التحليلات الآتية تستخدم فى حسابات الإحتراق

الهواء ٪	بالحجم	بالوزن
O_2	21.00	23
N_2	79.00	77

مع إفتراض النسبة الثابتة للأكسجين والنيتروجين والتى تشتمل كل المكونات الخاملة، فإن مكافئ الأكسجين يكون ذو علاقة بمكافئ متطلبات الهواء.

حسابات الإحتراق مبنية على عدد من الإفتراضات:

أ. فرضية أفوجادرو:

الأحجام المتساوية من الغازات المقاسة عند نفس ظروف درجة الحرارة والضغط تحتوى أعداد مساويه من الجزيئات.

ب. قانون الغاز المثالي الذي يطبق:

حيث معظم تفاعلات الإحتراق تتضمن درجة حرارة عاليه وضغط كلى قريباً من ضغط جوى واحد أى (PV=nRT).

ج. المحافظة على العناصر الكيميائية:

إجمالى كتلة S,N,O,H,C قبل التفاعل هى نفسها مثل تلك بعد التفاعل.

د. قانون دالتون للضغط الجزئي المطبق في خليط الغازات:

كل مكون عند نفس درجة الحرارة موجود فى وعاء سوف يحدث ضغط جزئىP1، لذلك:

$$P = \Sigma P_1$$

هـ. المحفاظ على الطاقة:

بالنسبة لكتلة معينة من الوقود ، المؤكسد، المخفف أى إجمالى طاقة مواد التفاعل = إجمالى طاقة المنتجات.

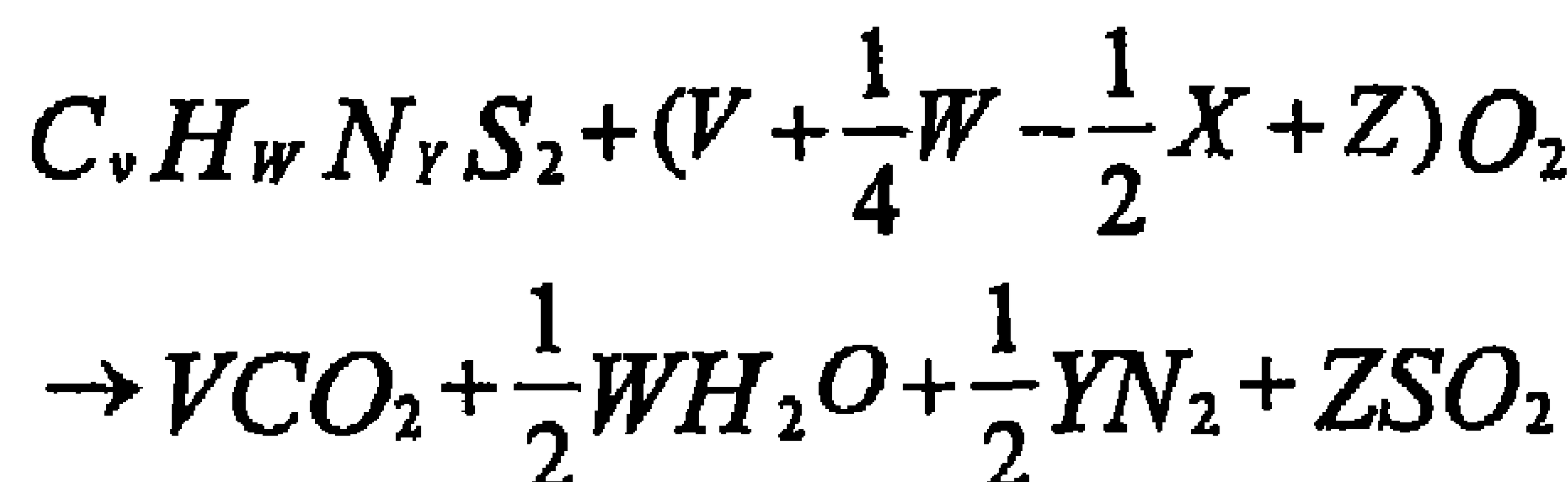
جداول المحتوى الحرارى (Enthalpy) تستخدم عادة صفر درجة مئوية (صفرْم) كدرجة حرارة إسترشادية بالنسبة لمحتوى حرارى صفر. لذلك، فإن الحرارة المحسوسة يمكن حسابها من درجة الحرارة الإسترشادية هذه. حرارة التفاعل الكيماوي، التى يتم تعيينها بواسطة مقياس السعر الحرارى (Calorimeter) هى عموماً تقيم طبقاً لدرجة حرارة الأساس الإسترشادى 25 °م والحرارة المسبقة لمواد التفاعل والمنتجات يتم تصميمها لدرجة الحرارة هذه فى القياسات السعرية (Calorimetry) .

و. معظم أعمال الإحتراق يكون عند ضغط ثابت (عملياً قريباً من واحد جوى):

لذلك يمكن فرض حالات الضغط الثابت وذلك فى حالة عدم خلاف ذلك.

ز. الهواء النظرى :

يعرف بانه كمية الهواء لوحدة الكتلة من الوقود التى تكون كافيه للإحتراق الكامل لإنتاج N2,SO2,H2O,CO2. للتفاعل الإفتراضى.



$$C_V H_W N_Y S_Z + (V + \frac{1}{4}W - \frac{1}{2}X + Z) O_2 \rightarrow VCO_2 + \frac{1}{2}WH_2O + \frac{1}{2}YN_2 + ZSO_2$$

الهواء النظرى يكون:

$$\text{حجم} \quad \frac{V+\frac{1}{4}W-\frac{1}{2}X-Z}{0.21}$$

لوحدة الحجم للوقود الإفتراضى CV HW O2 NY SZ الهواء النظرى يكون رقم ثابت لوقود معين.

ح. الهواء الزائد:

هو كمية عملية من الهواء التى يتم إمدادها فى عملية الإحتراق عادة لضمان أنه تحت الظروف الغير مناسبة لخلط الوقود مع الهواء فإن عملية الإحتراق يحتمل أن تسير نحو الإكتمال. عادة يتم الإمداد بهواء زائد بنسبة 10 ،15 –20، 20–25، 50–100٪ مع الوقود الغازى، السائل والوقود المطحون والوقود الصلب على التوالى.

$$\text{الهواء الزائد} = \frac{\text{الهواء الحقيقي} - \text{الهواء النظرى}}{\text{الهواء النظرى}}$$

$$= \frac{\text{الأكسجين الحقيقى} - \text{الأكسجين}}{\text{الأكسجين النظرى}}$$

ط. على غير غرض التآكل التقليدي:

هو أن الكبريت يحترق إلى ثانى أكسيد الكبريت. (عملياً أن 3٪ كبريت فى الغازات يمكن أن يكون (SO_3) جزئ منه يكون لاحقاً لعملية الإحتراق ويكتمل فى الجو العلوى.

ى. يفترض أن الأكسجين في الوقود يساهم في تفاعل الإحتراق:

لذلك فإن المفرقعات تحتوى تقريباً الأكسجين المكافئ.

ك. باستثناء الكمية الصغيرة جداً للنيتروجين:

التى تكون (NO_2), (NO)، فإن النيتروجين فى الوقود يفترض تقليدياً أن يكون غاز (N_2) عند الإحتراق.

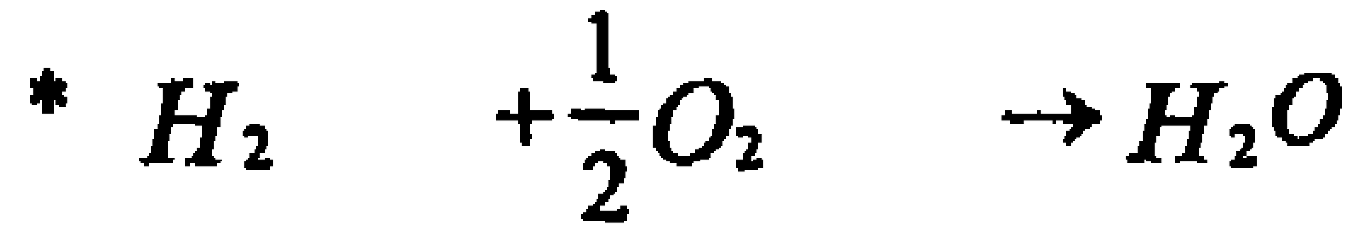
ل. تفاعلات الإحتراق الكامل الأساسية:



$$* \; C + O_2 \rightarrow CO_2$$

(واحد جزئ على أساس الحجم) 1 جزئ 1جزئ 1 جزئ

على أساس الكتلة 44 كجرام 32 كجرام 12 كجرام



$$* \quad H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$

(على أساس الحجم) 1 جزئ $\frac{1}{2}$جزئ 1 جزئ

على أساس الكتلة 18 كجرام 16 كجرام 2 كجرام



$$* \quad S + O_2 \rightarrow SO_2$$

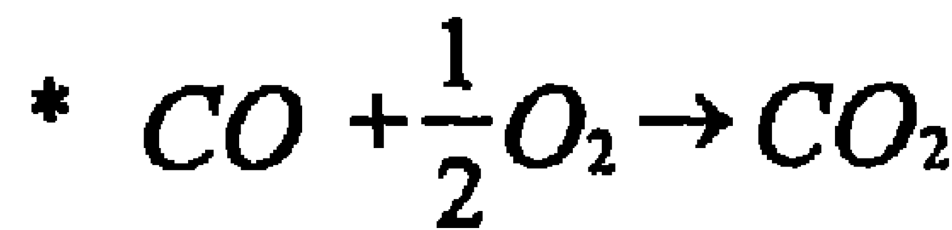
(على أساس الحجم) 1 جزئ 1جزئ 1 جزئ

على أساس الكتلة 64 كجرام 32 كجرام 32 كجرام

تلك التفاعلات تخضع لقوانين الجبر، حيث كل تفاعل يمكن أن يتم ضربه (مضاعفته) بواسطة أى معامل ثابت، وبالتالى يمكن إضافة أو طرح التفاعلات. التفاعلات تكون دائماً فى إتجاه موجب.

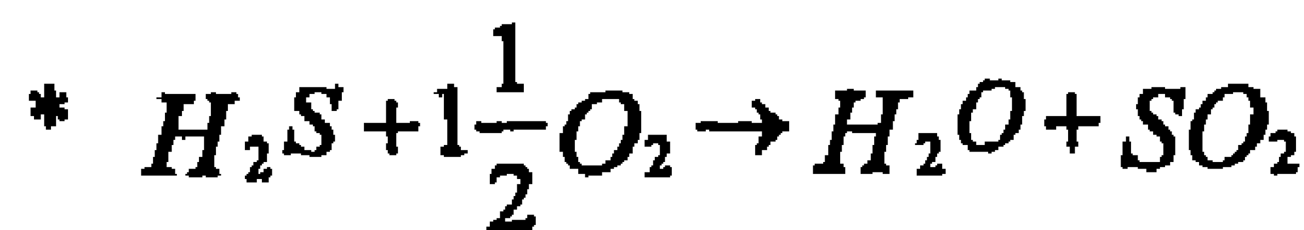
بعض التفاعلات العادية للإحتراق هى:

أول أكسيد الكربون:



$$* \quad CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$$

كبريتيد الهيدروجين:



$$* \quad H_2S + 1\frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + SO_2$$

الميثان:



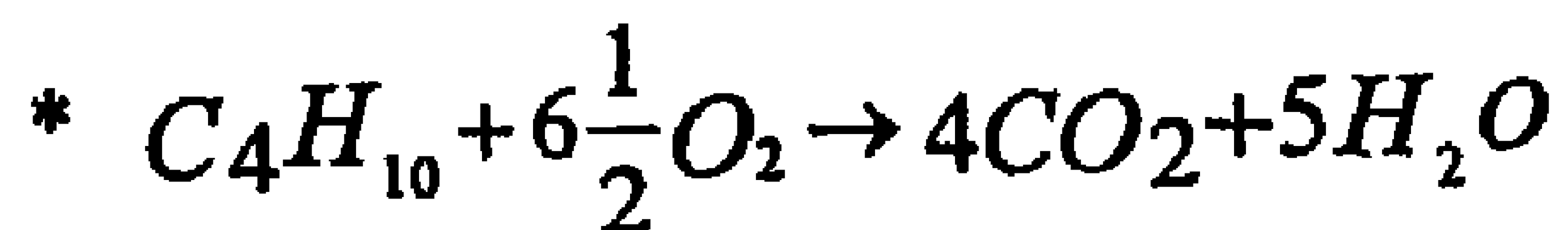
$$* \quad CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$$

البروبين (Propane):



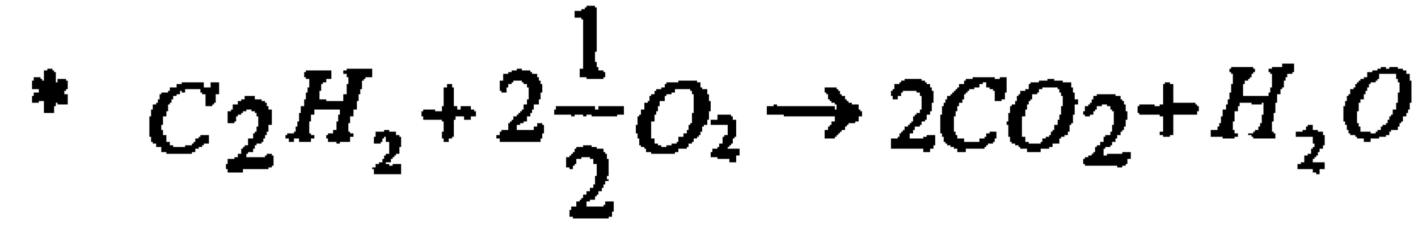
$$* \quad C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$$

البيوتين (Butane):



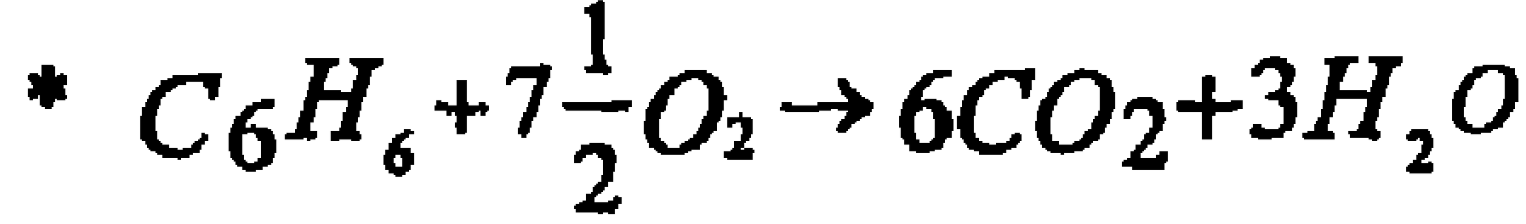
$$* \quad C_4H_{10} + 6\frac{1}{2}O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$$

الإستيلين :



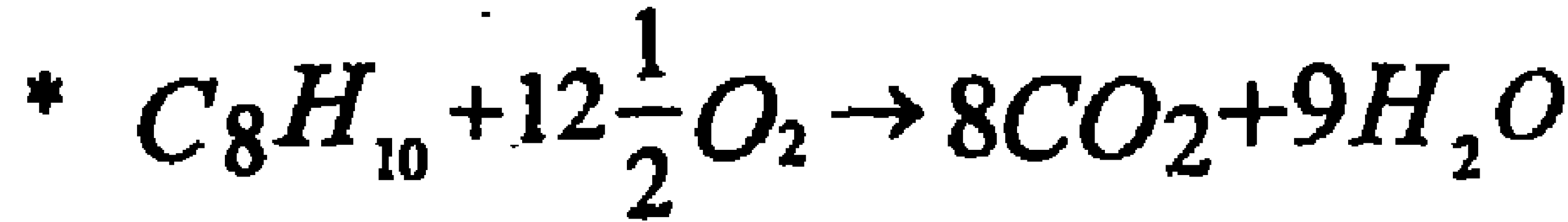
$$* \quad C_2H_2+2\frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2CO_2+H_2O$$

البنزين :



$$* \quad C_6H_6+7\frac{1}{2}O_2 \rightarrow 6CO_2+3H_2O$$

الأوكيتين (Octane) :



$$* \quad C_8H_{10}+12\frac{1}{2}O_2 \rightarrow 8CO_2+9H_2O$$

م. تحليل الوقود الصلب والسائل:

يتم عادة تقديره على أساس الكتلة، بينما الوقود الغازى على أساس الحجم. تحليل الغازات العادمة يقدر عادة بالحجم على أساس الجفاف ذلك لأن التكثيف يحدث من العينة. الرطوبة يتم تعيينها مستقلاً وذلك في حالة قياسها.

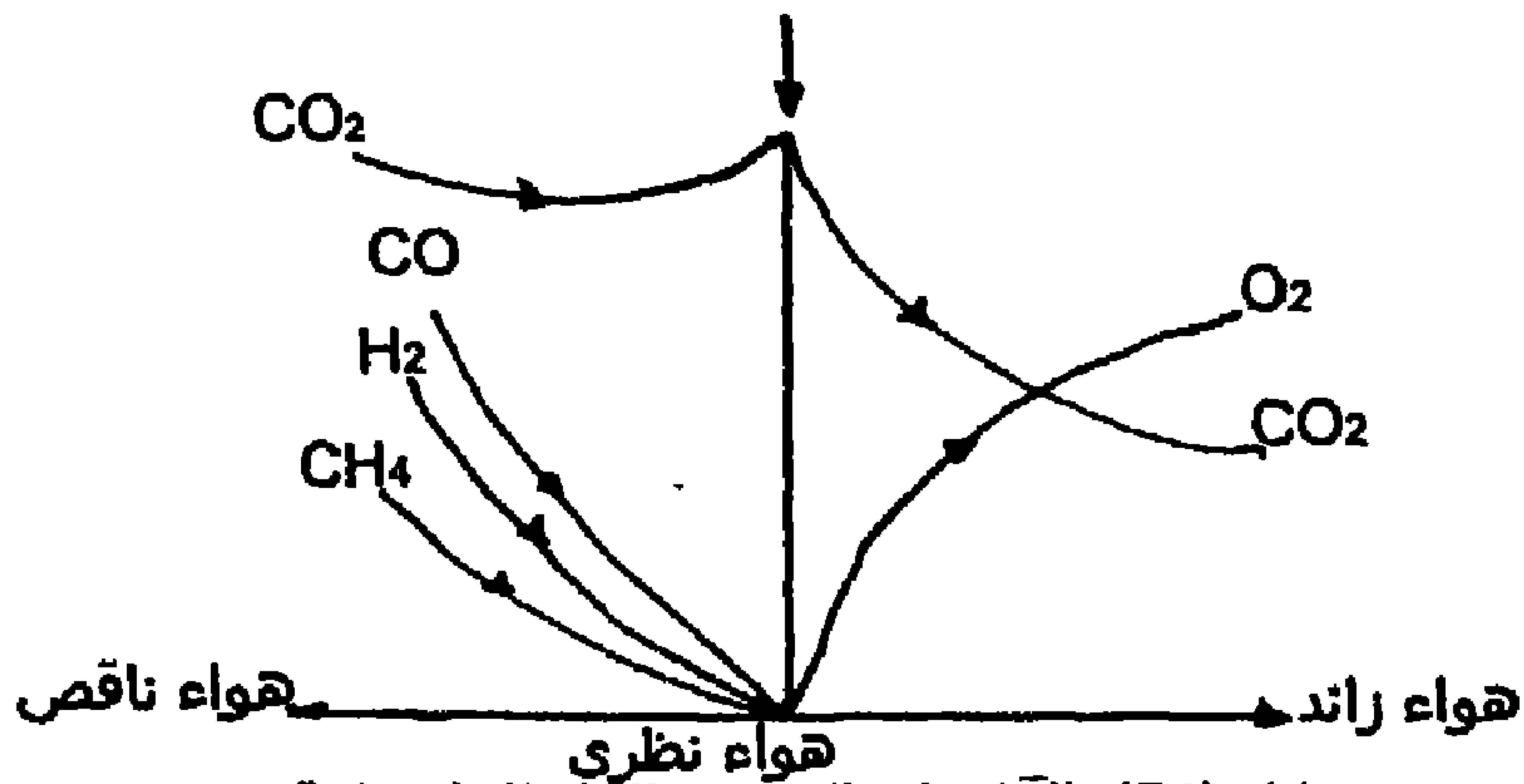
ن. أقصى (CO2):

تعرف بنسبة حجم CO2% في الغاز العادم (على أساس الجفاف) عند الإحتراق الكامل للوقود بالهواء المكافئ.

2. الإحتراق الغير كامل : (In Complete Combustion)

تكوين الدخان الأسود، السناج، القار، والمنتجات ذات التحلل والتفكك الجزئي للوقود الغير محترق تلك كلها علامات للإحتراق الغير كامل. مع تحليل الغازات العادمة ووجود H_2,CO أو CH_4 فإن ذلك يبين عدم الإحتراق الكامل. العملية يمكن أن تتم بتعمد كما في التغويز (Gasification) وأحياناً لأجواء الإختزال في المعالجة الحرارية للمعادن. وغالباً فإنها ترجع إلى الهواء الغير كافي للإحتراق الكامل أو الخلط الغير جيد للوقود مع الهواء.

الشكل رقم (51) يبين التغير التقريبي في مكونات (الجاف) الغاز العادم لوقود معين مع تغير كمية الهواء بإفتراض التفاعل الكامل للأكسجين المتاح.

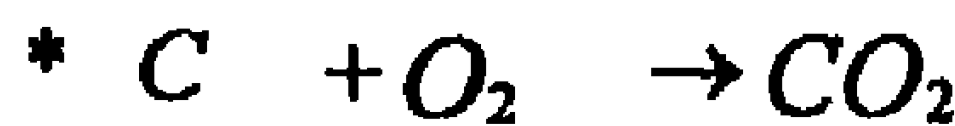


شكل (51): المكونات التقريبية للغاز العادم لوقود معين مع تغير كمية الهواء مع إفتراض التفاعل التام للأكسجين المتاح

المعادلات للمخاليط ذات العناصر المتكافئة أو الصحيحة كيميائيا:

Equations For Stoichio metric Or Chemically Correct Mixtures

1. إحتراق الكربون إلى CO2 (التحاليل بالوزن):



بإدخال قيم الأوزان الجزيئية :

12 وحدة بالوزن + 16×2 وحدة وزن = 44 وحدة بالوزن.

في حالة إعتبار وحدة الوزن بالكيلوجرام:

$\therefore$ 12 كجرام (C) + 32 كجرام (O_2)$\rightarrow$44 كجرام (CO_2)

$\therefore$ واحد كجرام (C) + $\frac{32}{12}$ كجرام (O_2)$\rightarrow$ $\frac{44}{12}$ كجرام (CO_2)

أو 1 كجرام (C) + $\frac{8}{3}$ كجرام (O_2)$\rightarrow$ $\frac{11}{3}$ كجرام (CO_2)

2. إحتراق الكربون إلى CO2 (التحليل بالحجم).

طبقاً لفرضية أفوجادرو. جزئيات كل الغازات تشغل نفس الحجم تحت نفس ظروف درجة الحرارة والضغط.

لذلك، مع إهمال حجم الكربون الصلب + حجم واحد O_2 = حجم واحد من CO_2.

أو حجم واحد من الأكسجين يتحد مع الكربون لإنتاج حجم واحد من CO_2. لذلك، لا يوجد تمدد أو إنكماش جزيئي.

وعند إحتراق الكربون إلى أول أكسيد الكروبون: (التحليل بالوزن)

أ.



∴2 × 12 كجرام (C) + 2 × 16 كجرام (O_2) ←2 (12 + 16)كجرام (CO)

أى 24 كجرام (C) + 32 كجرام (O_2) ←56 كجرام (CO)

∴ واحد كجرام (C) + $\frac{4}{3}$ كجرام (O_2) ← $\frac{7}{3}$ كجرام (CO)

ب. إحتراق الكربون إلى أول أكسيد الكربون (التحليل بالحجم).



$$* \; 2C \quad + O_2 \quad \rightarrow 2CO$$

مع إهمال حجم الكربون الصلب.

حجم واحد من (O_2) يتحد مع الكربون = 2 جم من CO

لا توجد زيادة فى الحجم هنا.

<u>3. عند إحتراق أول أكسيد الكربون إلى ثاني أكسيد الكربون (التحليل بالوزن).</u>



$$* \; 2C \quad + O_2 \quad \rightarrow 2CO_2$$ أ.

28x2 كجرام + 32 كجرام ←2 × 44 كجرام

∴ واحد كجرام (CO) + $\frac{4}{7}$ كجرام الأكسجين ← $\frac{11}{7}$ كجرام من (CO_2)

ب. إحتراق أول أكسيد الكربون إلى ثانى أكسيد الكربون (التحليل بالحجم)



$$* \; 2C \quad + O_2 \quad \rightarrow 2CO_2$$

∴2 حجم (CO) + واحد حجم (O_2) ←2 حجم (CO_2)

يوجد إنكماش جزيئ فى الحجم.

<u>4. إحتراق الكبريت :</u>

أ. إحتراق الكبريت إلى ثانى أكسيد الكبريت (التحليل بالوزن).



$$* \; S \quad + O_2 \quad \rightarrow SO_2$$

32 كجرام من الكبريت + واحد كجرام من الأكسجين ←2 كجرام من (SO_2)

ب. إحتراق الكبريت إلى ثانى أكسيد الكبريت (التحليل بالحجم).



$$* \; S \quad + O_2 \quad \rightarrow SO_2$$

مع إهمال حجم (S) + حجم واحد من (O_2) ← حجم واحد من (SO_2)

لا يوجد هناك إنكماش أو تمدد فى الحجم.

5. إحتراق الميثان:

أ. الإحتراق الكامل للميثان (التحليل بالوزن)



$$* \ CH_4 \quad +2O_2 \quad \rightarrow CO_2+2H_2O$$

16.∴ كجرام + 64 كجرام ← 44 كجرام + 36 كجرام

∴ واحد كجرام (CH_4) + 4 كجرام (O_2) ← $\frac{11}{4}$كجرام من (CO_2) + $\frac{9}{4}$ كجرام من (H_2O)

ب. الإحتراق الكامل للميثات (التحليل بالحجم)



$$* \ CH_4 \quad +2O_2 \quad \rightarrow CO_2+2H_2O$$

حجم واحد + 2 حجم ← حجم واحد + 2 حجم

أى حجم واحد من (CH_4) + 2 حجم من (O_2) ← حجم واحد من (CO_2) + 2حجم من (H_2O) (بخار).

لا يوجد تمدد أو إنكماش فى الحجم.

6. إحتراق الإيثيلين :

أ. الإحتراق الكامل للإيثيلين (التحليل بالوزن)



$$* \ C_2H_4 \quad +3O_2 \quad \rightarrow 2CO_2+2H_2O$$

28 كجرام + 96 كجرام ← 88 كجرام + 36 كجرام

∴ واحد كجرام من(C_2H_4) + $\frac{24}{7}$ كجرام (O_2) ← $\frac{22}{7}$ كجرام من (CO_2) + $\frac{9}{4}$ كجرام من (H_2O)

ب. الإحتراق الكامل للإيثيلين (التحليل بالحجم)



$$* \ C_2H_4 \quad +3O_2 \quad \rightarrow 2CO_2+2H_2O$$

حجم واحد + 3 حجم ← 2 حجم + 2 حجم

∴حجم واحد من (C_2H_4) + 3 حجم من (O_2) ← 2 حجم من (CO_2) + 2 حجم من (H_2O) (بخار).

لا يوجد إنكماش أو تمدد جزيئ.

الجزئ والألف جزئ وجزء من الجزئ:

Mole, Kilo mol And Mole Fraction

جزئ المادة هو كتلة المادة التي تساوي عددياً الوزن الجزيئي للمادة لذلك فإنه يمكن تقدير الجزئ الجرامي (Mole) كالآتي:

$$\text{الجزئ الجرامى} = \frac{\text{وزن المادة بالكيلو جرام}}{\text{الوزن الجزيئى للمادة}}$$

الجزيئات مفيدة خاصة في حالة الوقود الغازى ذلك لأم معادلات التفاعلات الكيميائية هى كذلك معادلات جزيئية. قانون أفوجادرو ينص على أنه عند نفس الظروف لدرجة الحرارة والضغط، فإن الحجم الثابت لأى غاز يحتوى نفس العدد من الجزيئات. بمعنى آخر الحجم الجزيئي (Molecular Volume) لكل الغازات هو نفسه عند نفس حالات الضغط ودرجة الحرارة. لذلك فإن الحجم الجزيئي لأى غاز يمكن تقديره كالآتي:

$$PV = MRT$$

حيث:

M = عدد الجزيئات في الغاز.

R = ثابت الغاز أو

$$V_{mole} = \frac{848T}{P}$$

حيث:

T = درجة حرارة كيلفن (°K)

P = الضغط كجرام / المتر المربع (KgF/m^2)

V = تقدر بالمتر المكعب.

كذلك يمكن تقديرها كالآتي:

$$V = \frac{0.0848T}{P}$$

حيث P مقدره بالكيلو جرام/سم^2 (KgF/m^2)

الكيلو مول: (Kilo Mole)

الوزن الجزيئ لمادة هو عدد يتناسب مع كتلة الجزئ. لذلك في حالة تقدير الكتلة في أى نظام للوحدات، فإن الجزئ سوف يتم تسميته بالمقابل. لذلك، واحد كيلومول من الأكسجين

سوف يعني 32 كيلوجرام من الأكسجين. واحد جرام مول من الأكسجين سوف يعني 32 جرام من الأكسجين.

مثال:

المكونات الحجمية للوقود الغازى هى الآتى:

H_2 = 50 %، CH_4 = 20 %، C_2H_4 = 2 %، CO_2 = 5 %، CO = 16 %، N_2 = 7 % عين الوزن الجزيئى وكثافة المخلوط عند درجة الحرارة والضغط القياسى (S.T.P) إذا كان الضغط الكلى للخليط هو 1.03 كيلوجرام/سم^2 (KgF/Cm^2). عين كثافة المكونات بالوزن

الحل:

الثابت العالى للغاز (MP) لأى غاز، يساوى 848 لذلك فيكون لدينا.

مكونات الغاز	نسبة المكونات بالحجم	الجزء الجزيئى X	الوزن الجزيئي M
H_2	50	0.5	2
CH_4	20	0.2	16
C_2H_4	2	0.02	28
CO_2	5	0.05	44
CO	16	0.16	28
N_2	7	0.07	28

لذلك، فإن الوزن الجزيئي للخليط:

M (للخليط) =

$$13.4 = 28\times0.07+28\times0.16+44\times0.05+28\times0.02+16\times0.2+2\times0.5$$

الحجم الجزيئي للغاز عند (.S.T.P) (أى عند 15°م ، 760°م سم زئبق) وجد كالآتى:

T= 15°م = (273 + 15) درجة كلفن (°K)

P= 1.03 كجرام/سم^2 = 1.03 ×10^4 كجرام / متر مربع

الحجم الجزيئي (V_{mol})=

$$= \frac{848T}{P} = \frac{848\times(273+15)}{1.03\times10^4}$$

$$= \frac{288\times848}{10^4\times1.03} = 23.67$$ متر مكعب

لذلك فإن كثافة الغاز تقدر بالآتى:

$$= \frac{\text{الوزن الحجم للجزيئي مقدار بالكيلوجرام}}{\text{الوزن الحجم للجزيئي مقدار بالتر المكعب}}$$

$= \frac{13.4}{23.67} = 0.565$ كجرام/ التر المكعب عند (S.T.P)

المكونات الوزنية: (Gravimetric Composition)

مكون الغاز	الجزء الجزيئي X	الوزن الجزيئي M	ناتج M.X	التحليل الوزنى
H_2	0.5	2	1.00	$\frac{1}{13.4} = 0.0746$ أو 7.46%
CH_4	0.2	16	3.2	$\frac{3.2}{13.4} = 0.239$ أو 23.9%
C_2H_4	0.02	28	0.56	$\frac{0.56}{13.4} = 0.0418$ أو 4.18%
CO_2	0.05	44	2.2	$\frac{2.2}{13.4} = 0.1642$ أو 16.42%
CO	0.16	28	4.48	$\frac{4.48}{13.4} = 0.334$ أو 33.4%
N_2	0.07	28	1.96	$\frac{1.96}{13.4} = 0.1466$ أو 14.66%

مثال:

عند إختبار غلايه وجد أن الغاز العادم يترك الغلاية عند درجة حرارة 275°م. المكون الحجمى للغاز العادم كان:

11.6 % CO_2 ، 6.8 % O_2، 0.5 % CO ودرجة حرارة الهواء الداخل كانت 20°م.

إذا كان الفحم المستخدم فى الفرن به 79.5% بالوزن كربون، قدر الحرارة المحمولة بعيداً بواسطة الغازات الخارجة لكل واحد كيلو جرام من الفحم المحروق. إفترض متوسط الحرارة النوعية للغاز العادم لتكون 0.24 كيلو كالورى/كجرام × درجة حرارة كلفن.

الحل:

البيانات لم توفر محتوى الغاز العادم من الهيدروجين ، لذلك فإنه يتم إعتبار الغاز العادم أنه جاف :

مكون الغاز	التحليل بالحجم A %	الوزن الجزيئي B	الوزن النسبي $C = A \times B$	التحليل بالوزن $D = \frac{C}{\Sigma C}$	الكربون لكل كجرام من مكون الغاز E	وزن الكربون لكل كجرام من الغاز العادم $F = D \times E$
CO_2	11.6	44	510.00	0.1693	$\frac{12}{14}$	0.0462
O_2	6.8	32	217.6	0.0722	–	–
CO	0.5	28	14.00	0.00463	$\frac{12}{24}$	0.00199
N_2	81.1 بالفرق	28	2.272	0.754	–	–
			C=3014	–	–	$\Sigma F = 0.04819$

لذلك فإن 0.04819 كجرام من الكربون يحترق ليعطى 1 كجرام من الغاز العادم لذلك 0.795 كجرام كربون (فى الفحم) سوف يعطى:

$= \frac{0.795}{0.0419}$ كجرام من الغاز العادم

= 16.5 كجرام من الغاز العادم الجاف/كجرام من الفحم. والحرارة التى تحمل بعيداً بالغازات الجافة لكل كجرام من حرق الفحم =

$0.24 \times 16.5 \times (275-20) = 1002$ كيلوكالورى.

تحويل التحليل الوزنى إلى تحليل حجمى والعكس صحيح:

Conversion of Gravimetric Analysis To Volumetric And Vice versa:

1. حيث نظر الوزن الجزيئي لكل الغازات يشغل نفس الحجم، الحجم النسبي للمكون الغاز مضروباً فى الوزن الجزيئي لمكون الغاز سوف يعطى الوزن النسبي لمكون الغاز.
2. والوزن النسبي لمكون الغاز مقسوماً على وزنه الجزيئي سوف يعطى الوزن النسبي لمكون الغاز.

مثال:

التحليل الحجمي لعينة الغاز العادم هي:

10.5 ٪ CO_2، 0.5 % CO، 8 % O_2، 81 % N_2 ، (بالفرق). عين المكونات الوزنية.

الحل:

مكون الغاز	نسبة التحليل الحجمي A٪	الوزن الجزيئي B	الوزن النسبي $C = A \times B$	نسبة التحليل الوزني ٪ $D = \frac{C}{\Sigma C} \times 100$
CO_2	10.5	44	462	$\%15.4 = 100 \times \frac{462}{3000}$
CO	0.5	28	14	$\%0.4665 = 100 \times \frac{14}{3000}$
O_2	8	32	256	$\%8.533 = 100 \times \frac{256}{3000}$
N_2	81	28	2268	$\%75.134 = 100 \times \frac{2268}{3000}$
			$\Sigma C = 3000$	$\Sigma D = 100\%$

مثال:

نسبة التحليل بالوزن للغاز العادم هي:

16 ٪ CO_2، 0.95 % CO ، 7.6 % O_2 ، 75.45 % N_2 ، عين نسبة التحليل الحجمي في المثال:

الحل:

CO_2	16	44	0.362	٪ 10.95
CO	0.95	28	0.00339	٪1.026
O_2	7.6	32	0.2375	٪7.2
N_2	75.45	28	2.695	٪80.85
			$DC = 3.29789$	$\Sigma D = 100\%$

أدنى هواء مطلوب بالكيلوجرام لحرق الوقود الصلب والسائل:

لنتناول عينه من الوقود محتويه على:

أجزاء كربون (C) بالوزن للكربون، أجزاء (H_2) بالوزن للهيدروجين، أجزاء (O_2) بالوزن للأكسجين، أجزاء (S) بالوزن الكبريت.

لذلك فيكون لدينا.

C كيلو جرام من الكربون يحتاج $\frac{8}{3}\times C$ كيلو جرام من الأكسجين

H_2 كيلو جرام من الهيدروجين يحتاج $8\times H$ كيلو جرام من الأكسجين

S كيلو جرام من الكبريت يحتاج $1\times S$ كيلو جرام من S

وO_2 كيلو جرام من الأكسجين موجود اصلاً فى الوقود.

لذلك الأكسجين المطلوب للحرق الكامل لواحد كيلو جرام من الوقود كالآتى:

$$(\frac{8}{3}C+8H_2+S-O_2)=\frac{8}{3}C+8(H_2-\frac{O_2}{8})+S$$

الهواء الجوى يحتوى 23٪ بالوزن من الأكسجين. لذلك فإن أدنى هواء/كجرام للوقود =

$$[S+(\frac{O_2}{8}-H_2)8+\frac{8}{3}C]\frac{100}{23}=$$

$$4.35S+(\frac{O_2}{8}-H_2)34.8+11.6C=$$

أدنى كمية من الهواء مطلوبة يمكن حسابها في شكل جدول الذى يعطى فكرة عن نواتج الإحتراق.

مثال:

عينة من الفحم لها نسبة المكونات الآتية بالوزن.

C = 77.7 %، H_2 = 6.8 %، N_2 = 1.2 %، S = 2.2 %، O_2 = 8.8 %

والمواد الغير قابلة للإحتراق = 3.3٪.

عين كمية الهواء المطلوبة للإحتراق الكامل لكيلو جرام من الفحم ومكونات ناتج الإحتراق بالكيلو جرام من الفحم.

الحل:

المكون	الوزن لكل كيلو جرام من الفحم A٪	O_2 اللازم لكل كجرام من المكونات B	الأكسجين اللازم لكل كيلو جرام من الوقود $C = A \times B$	نواتج الإحتراق بالكيلو جرام لكل كيلو جرام من الوقود			
				CO_2	H_2O	SO_2	N_2
C	0.777	$\frac{8}{3}$	2.072	28.49	–	–	–
H_2	0.068	8	0.544	–	0.612	–	–
N_2	0.012	–	–	–	–	–	0.012
S	0.022	1	0.02	–	–	0.022	–
O_2	0.088	1-	0.088-	–	–	–	–
الرماد	0.033	–	–	–	–	–	–
			$\Sigma C = 2.550$				

لذلك، أدنى هواء مطلوب للإحتراق الكامل.

$$= 2.55 \times \frac{100}{23} = 11.1$$ كجرام/كجرام من الفحم

الهواء الزائد: Excess Air

كمية الهواء بالكيلوجرام الزائد عن أدنى هواء نظرى مطلوب للإحتراق الكامل للوقود يسمى الهواء الزائد. الاكسجين الحر فى نواتج الإحتراق يعتبر مؤشر للهواء الزائد. عادة يتم توفير مؤشر الهواء الزائد بواسطة مسجل (CO_2). بالنسبة للوقود المحتوى فقط على كربون، فإن الإحتراق الصحيح النظرى سوف ينتج منتجات إحتراق فقط CO_2، N_2 وسوف تكون بنفس النسبة بالحجم مثل نسبة الأكسجين والنيتروجين فى الجو. لذلك، فإن نسبة CO_2 لا يمكن أن تزيد عن 21٪، أى بنسبة O_2 بالحجم فى الهواء . عادة نسبة CO_2 تتغير من 10 إلى 12٪ بالحجم فى غلايات الإشعال بالفحم مع السحب الطبيعي للهواء ومن 10 إلى 15 ٪ بالحجم فى الغلايات حيث يتم السحب الصناعى للهواء. تلك الأرقام المنخفضة هى نتيجة تخفيف نواتج الإحتراق بالهواء الزائد.

مثال:

تحليل الفحم المستخدم فى الغلاية هو كالآتى:

82 ٪ كربون، 6٪ هيدروجين، 4٪ أكسجين، 2٪ رطوبة، 8٪ رماد.

عين أدنى هواء نظرى مطلوب للإحتراق الكامل للكيلو جرام من الفحم.

إذا كان الإمداد الحقيقى بالهواء هو 18 كجرام/كجرام من الفحم والهيدروجين كامل الإحتراق، 80٪ من الكربون تم حرقه إلى CO_2 ، والباقى إلى CO، عين التحليل الحجمى لمنتجات الإحتراق الجاقة.

الحل:

للإحتراق الكامل فإن كل الكربون فى الوقود يجب حرقه إلى CO_2،لذلك أدنى هواء مطلوب =

$$S4.35+(\frac{O_2}{8}-H_2)34.8+11.6C=$$

$$(\frac{0.04}{8}-0.06)34.8+0.82\times11.6=$$

$= 0.5 + 1.912 = 11.412$ كيلو جرام لكل كيلوجرام من الوقود

ولكن الحقيقة 80 ٪ من الكربون المتاح تم حرقه إلى CO_2. لذلك CO_2 الحقيقي المنتج

$=0.8\times0.82\times\frac{44}{12}=2.403$ كيلو جرام من CO_2.

لذلك الأكسجين الحقيقى المطلوب بجزء الكربون المحترق إلى CO_2

$=0.8\times0.82\times\frac{32}{12}=1.749$ كيلو جرام من الأكسجين

بالمثل 20٪ من الكربون تم حرقه إلى CO و CO المنتج

$=0.8\times0.82\times\frac{16}{12}=0.219$ كيلو جرام من الاكسجين

كذلك الأكسجين المطلوب بواسطة الهيدروجين

$=0.06\times8=0.48$ كيلو جرام من الأكسجين.

والماء المنتج $=0.06\times9=0.54$ كيلو جرام من الماء.

الهواء الحقيق المستخدم 18 كيلوجرام. فهو يحتوى أكسجين

$= 18 \times \frac{23}{100} = 4.14$ كيلو جرام أكسجين

لذلك فإن O_2 الحر في الغاز العادم

= 4.14 (من إمداد الهواء)– 0.219(CO) - 0.48 (H_2O) = 1.732 كجرام/كجرام من الفحم

والنيتروجين في الغاز العادم = 18 × 0.77= 13.87 كجرام/كجرام من الفحم

مكونات الغاز	كجم لمكونات الغاز لكل كجرام من الفحم A٪	الوزن الجزيئي B	الوزن النسبي $C = A \times B$	نسبة الحجم لمكونات الغاز ٪ $D = \frac{C}{\Sigma C} \times 100$
CO_2	2.403	44	0.0546	٪8.84
CO	0.383	28	0.0137	٪2.22
O_2	1.732	32	0.0541	٪8.74
N_2	13.87	28	0.4953	٪80.2

مثال:

تحليل الفحك في الغلايه كان C = 81 %، H_2 = 4.5 %، O_2 = 8 % الباقي غير قابل للإحتراق.

تحليل (Orsat) للغاز العادم الجاف كان CO_2 = 8.3 %، CO = 1.4 %، O_2 = 10 %، N_2 = 80.3 % (بالفرق)

عين:

أ. وزن الهواء الذى تم إمداده لكل كجرام من الفحم.

ب. نسبة الهواء الزائد.

الحل:

مكونات الغاز	المكونات الحجمية A %	الوزن الجزيئي B	الوزن النسبي $C = A \times B$	التحليل بالوزن $D = \frac{C}{\Sigma C}$	الكربون لكل كجرام من المكون E	وزن الكربون لكل كجرام من الغاز العادم $F = D \times E$
CO_2	8.3	44	365.2	0.1228	$\frac{12}{44}$	0.0335
CO	1.4	28	39.2	0.0132	$\frac{12}{28}$	0.00566
O_2	10.00	32	320.2	0.1076	–	–
N_2	80.3	28	2249	0.756		
$\Sigma F = 0.03916$			$\Sigma = 2978.4$			

لذلك، لكل 0.81 كجرام من الكربون فى 1 كجرام من الفحم الغاز العادم سيكون $= \frac{0.81}{0.03916} = 20.68$ كجرام من الغاز العادم الجاف لكل كجرام من الفحم

الماء المتكون = 0.045x9 = 0.405 كجرام لكل كجرام من الفحم

المواد الغير قابلة للإحتراق = 1- (0.08+0.045x0.81)

= 0.065 كجرام / كجرام من الفحم

لذلك ، إمداد الهواء لكل كجرام من الفحم.

= 0.405x20.86 – (1-0.065)

= 21.085 – 0.935

=20.15 كجرام لكل كجرام من الفحم

أدنى هواء مطلوب لكل كجرام من الفحم

$$= 11.6 \times C + 34.8(H_2 - \frac{O_2}{8}) - 4.35 \times S$$

$$= 0.81 \times 11.6 + 0.8 + 34.8(0.045 - \frac{0.08}{8})$$

$$= 934 + 1.2175 + 9.4$$

$= 10.6175$ كجرام هواء لكل جرام فحم

لذلك فإن نسبة الهواء الزائد

$$= \frac{10.6175 - 20.15}{10.6175}$$

$$= \frac{9.5325}{10.6175} \times 100 = \%89.8$$

مثال: (أ)

إحسب كمية الهواء المطلوب للإحتراق الكامل نظرياً لـ100 كجرام من الفحم الذى له المكونات الآتية:

C = 83 %، H_2 = 6 %، O_2 = 4 %، الرماد = 8٪، الرطوبة = 2٪.

<u>الحل:</u>

أدنى O_2 مطلوب لإحتراق الكربون.

= 82 × 32 = 218.7 كجرام

أدنى O_2 مطلوب لإحتراق H_2.

$$= 6 \times \frac{32}{4} = 58$$

O_2 المتاح مع الفحم = 4 كجرام.

لذلك، O_2 الساخن المطلوب لإحتراق الفحم = 262.7 × 100

= 1141 كجرام

مثال: (ب)

إحسب كمية الهواء اللازمة نظرياً للإحتراق الكامل لـ(100 Nm^3) من غاز الفرن العالى ذو المكون الآتي (بنسبة حجم ٪)

CO_2 = 17 %، CO = 22.1 %، H_2 = 4.9 %، N = 55.8 %، O_2 = 0.2 %

الحل:

الأكسجين اللازم لحرق $CO = \frac{1}{2} \times 22.1$ م^3 = 11.05 م^3

الأكسجين اللازم لحرق $H_2 = \frac{1}{2} \times 4.91$ م^3 = 2.45 م^3

الأكسحين المتاح مع الغاز = 0.2 م^3

صافى O_2 اللازم للإحتراق الكامل=

$= 11.05 + 2.45 - 0.2 = 13.3$ م^3

الهواء المطلوب للإحتراق الكامل للغاز

$$= 13.3 \times \frac{100}{21} = 63.4$$ م^3

نسبة الهواء – الوقود: (Air – Fuel Ratio)

نسبة الهواء– الوقود يمكن تعيينها بسهولة إما بالحجم بالنسبة للوقود الغازى أو بالوزن للوقود الصلب/السائل بالطريقة الآتية:

فى حالة المثال (أ) السابق نسبة الهواء /الوقود بالوزن

$$= \frac{1141}{100} = 11.41$$ كجرام/كجرام

فى حالة المثال (ب) السابق نسبة الهواء/الوقود بالحجم

$$= \frac{63.4}{100} = 0.634$$ م^3 / م^3 (Nm^3/Nm^3)

Nm^3 تعنى حجم الغاز بالمتر المكعب عند الحرارة والضغط العادى (NTP) أى (صفر°م، 760 مليميتر زئبق)

مثال: (جـ)

لحساب حجم نواتج الإحتراق، يتم تقدير (100 Nm^3) لنفس الوقود (غاز الفرن العالى) كما ذكر فى المثال (ب).

الحل:

المكونات	نسبة الحجم %	الأكسجين المطلوب للإحتراق الكامل (Nm^3)	نواتج الإحتراق		
			CO_2	H_2O	N_2
CO_2	17	–	17	–	–
O_2	0.2	(–0.2)	–	–	–
CO	22.1	11.05	–	22.1	-
H_2	4.9	2.45	–	4.9	-
N_2	55.8	–	–	–	55.8
الإجمالى	100	13.3	39.1	4.9	55.8

بجانب نيتروجين الوقود، فإن نيتروجين الهواء المطلوب للإحتراق سوف يكون موجوداً كذلك فى نواتج الإحتراق، حجم الهواء اللازم للإحتراق كما تم حسابه فى المثال (ب).

$= 63.4\ Nm^3$

حجم (N_2) فى الهواء المطلوب للإحتراق

$$= \frac{79}{100} \times 63.4 = 0.1\ Nm^3$$

الآن يكون لدينا نواتج الإحتراق الآتية (لـ$100 Nm^3$ من غاز الفرن العالى)

		النسبة ٪ بالحجم
CO_2	$39.1\ Nm^3$	26.1
H_2O	$4.9\ Nm^3$	3.1
N_2	$(50.1+55.1)Nm^3$	70.8
الحجم الإجمالى لنواتج الإحتراق	$149.9\ Nm^3$	100

نسبة نواتج الإحتراق والوقود الغاز (بالحجم)

$$= \frac{149.9}{100} = 1.499$$

لذلك فإن ($100\ Nm^3$) من غاز الفرن العالى بالمكونات السابق ذكرها سيتطلب 63.4 متر مكعب من الهواء للإحتراق الكامل نظرياً وسوف ينتج 149.9 متر مكعب من الغازات العادمة الرطبه عند الإحتراق.

لإيجاد حجم مكونات الغاز الجاف، يمكننا إهمال H_2O من الغازات العادمة كالآتى:

		النسبة بالحجم ٪
CO_2	$39.1\ Nm^3$	27
N_2	$105.9\ Nm^3$	73
الإجمالى	**$145.00\ Nm^3$**	**100**

الهواء الزائد لإحتراق الوقود:

من الناحية العملية لا يمكن تحقيق الإحتراق الكامل إلا فى حالة إستخدام هواء يزيد عن المطلوب نظرياً. الحاجة إلى الهواء الزائد يعود إلى صعوبة تحقيق الإلتصاق الجيد بين الهواء والوقود. ويرجع جزئياً كذلك إلى الحاجة إلى إكمال الإحتراق خلال فضاء الإحتراق.

لتحقيق أقصى كفاءة يكون الأساس هو إستخدام النسبة الصحيحة للهواء الزائد. في حالة نسبة كبيرة جداً من الهواء فإن الهواء سوف يحمل حرارة إضافية ويخرج من النظام كحرارة محسوسة في غازات المدخنه. أما في حالة القليل جداً من الهواء فإن الإحتراق لن يكون كاملاً وغازات المدخنه سوف تحمل بعيداً الحرارة الكامنة الغير مستخدمة فى شكل غازات قابلة للإحتراق وغير محترقة، مثل أول أكسيد الكربون (CO)، الهيدروجين (H_2)، الميثان (CH_4). لذلك، فإن معامل الهواء الزائد يعرف كالآتى:

$$\text{معامل الهواء الزائد } (E) = \frac{\text{الهواء الحقيقي المستخدم للإحتراق}}{\text{الهواء المطلوب نظرياً للإحتراق الكامل}}$$

$$\text{نسبة الهواء الزائد} = (1-E) \times 100$$

تأثير الهواء الزائد على نواتج الإحتراق:

حجم ومكونات نواتج الإحتراق يمكن حسابه عند إستخدام هواء زائد للإحتراق كما هو موضح فى المثال التالى:

مثال (د):

بفرض أن 10٪ هواء زائد لإحتراق غاز الفرن العالى كما فى الشكل (ب)، (جـ) فإننا نجد:

الحل:

الحجم الإجمالى للهواء المطلوب = $69.7 = 63.4 \times 1.1$ (Nm3)

حجم الهواء الزائد = $6.3 = 63.4 - 69.7$ (Nm^3)

الحجم الإجمالى لنواتج الإحتراق = حجم نواتج الإحتراق بالهواء النظرى + حجم الهواء الزائد =

$= 149.9 + 6.3 = 156.2$ متر مكعب

O_2 فى الهواء الزائد = $6.3 \times \frac{21}{100} = 1.32 (Nm^3)$

H_2 فى الهواء الزائد = $6.3 - 1.32 = 4.98 (Nm^3)$

الآن بالإشارة إلى المثال (جـ) وجدت نواتج الإحتراق الآتية:

٪ النسبة بالحجم	كمية (متر مكعب) لكل 100 متر مكعب من الوقود	المكونات
25	39.1	CO_2
3.15	4.9	H_2O
71	=110.88 (4.98+105.9)	N_2
0 ..85	1.32	O_2
100	156.2	الإجمالى

تحويل التحليل الحجمى إلى تحليل بالوزن:

فى التحليل الحجمى لأى غاز معروف يمكن تحويله إلى تحليل بالوزن وذلك بضرب حجم كل مكون فى وزنه الجزيئي. هذا سوف يعطى الأوزان النسبية للمكونات، ثم يجمع تلك الأوزان وقسمة كل على الإجمالى، فإنه يتم الحصول على التحليل بالوزن.

مثل (هـ):

مثال نموذج الموضح فيما بعد بإعتبار غاز الفرن العالى بنفس المكونات كما فى المثال (ب):

الحل:

تحليل نسبة الأوزان ٪	الأوزان النسبية	الوزن الجزيئي B	٪ الحجم (A)	مكونات الغاز
22.4	748	44	17	CO_2
0.218	6.4	32	0.2	O_2
21	618	28	22.1	CO
0.332	9.8	2	4.9	H_2
55.05	1560	28	55.8	N_2
٪100	2942.2	الإجمالى		

أوزان الغاز العادم لكل كيلوجرام من الوقود المحترق:

وزن الغاز العادم سوف يزيد عن ذلك للوقود على حساب الهواء الذى تم إمداده — الوزن الحقيقي للغاز العادم الجاف يمكن تعيينه بمقارنة وزن الكربون فى الغازات العادمة مع وزن الكربون فى الوقود، حيث لا يوجد فقد فى الكربون خلال عملية الإحتراق.

فى حالة غلاية البخار قد يوجد بعض الكربون الغير محترق فى الرماد الموجود فى حفر الرماد. هذا يتم طرحه من الكربون فى الوقود.

الغازات العادمة سوف تحتوى على بخار، ذلك بسبب إتحاد الهيدروجين فى الوقود مع الأكسجين، البخار سوف يتكثف عند تبريد الغازات. تحليل عينه الغاز العادم عندئذ سوف تكون جافة. لذلك، نرى أن الغازات العادمة تحتوى الهواء الزائد الذى تم إمداده ولا يحتوى البخار المتكون بالإحتراق. لا يوجد من بين تلك الحالة ما سوف يؤثر على وزن الكربون فى العينة التى تم تحليلها.

لذلك فإن ميزان الكربون، وزن الغازات العادمة لكل كجرام من الوقود المحروق.

$$= \frac{\text{وزن الكربون فى كيلوجرام من الوقود}}{\text{وزن الكربون فى كيلوجرام من الغاز العادم}}$$

مثال: (و)

مع إعتبار نفس غاز الفرن العالى فى المثال (جـ)، (هـ) فإن وزن الكبرون فى واحد كيلو جرام من الوقود = وزن الكربون فى CO_2، CO

$$= \frac{25.4}{100} \times \frac{12}{44} \times \frac{12}{28} \times \frac{21}{100}$$

(حيث أن CO_2 = 25.4 %، CO = 21 ٪ بالوزن فى الوقود)

=0.0694 + 0.09 = 0.1594كجرام

الحل:

بالنسبة لوزن الكربون فى الغازات العادمة ، يكون من الضرورى تحويل تحليل الغاز العادم الجاف فى المثال (جـ) إلى تحليل وزن كالآتى:

مكونات الغاز	نسبة الحجم ٪	الوزن الجزيئي	الوزن النسبي	تحليل وزنى +
CO_2	27	44	1242 = 44×27	٪ 37.9
CO	73	28	2042 = 28×73	٪ 62.1

وزن الكربون فى واحد كيلو جرام من الغازات العادمة:

$$\frac{37.9}{100} \times \frac{12}{24} = 0.1035$$ كيلو جرام

لذلك فإن وزن الغازات العادمة لكل كيلو جرام من الوقود المحترق

$= \frac{0.1594}{0.1035} = 1.54$ كيلو جرام

بمعنى آخر نسبة الغاز العادم إلأى الوقود بالوزن = 1.54

القيمة الحرارية لخليط من الغازات:

Calorific Value Of A Mixture of Gases

القيمة الحرارية لخليط من الغازات يمكن تعيينها فى حالة معرفة القيمة الحرارية لكل من المكونات على حدة.

القيمة الحرارية لبعض المواد القابلة للإحتراق كالآتى:

أول أكسيد الكربون (CO)	3040 كيلو كالورى / Nm^3
الهيدوجين (H_2)	2590
الميثان (CH_4)	8560

مثال: (ز)

مع إعتبار غاز الفرن العالى للإحتراق كما فى المثال (ب) فإننا نجد:

المكونات القابلة للإحتراق	٪ بالحجم	القيمة الحرارية للغاز
CO	22.1	3040
H_2	4.9	2590

لذلك القيمة الحرارية لغاز الفرن العالى:

$0.221 \times 3040 + 0.049 \times 2590 = 799$ كيلو كالورى /م^3 N

كثافة خليط من الغازات: Density Of Mixture of Gases

كثافة خليط من الغازات يمكن إيجادها كذلك من كثافة المكونات لهذا الخليط. كثافات بعض الغازات موضحه فيما بعد.

المكونات	٪ الحجم	الكثافة كجرام/م3N	ملاحظات
CO_2	17	$\frac{44}{22.4} = 1.97$	1 كيلومول من أى غاز عند درجة الحرارة والضغط العادى يشغل 22.4 متر
O2	0.2	$\frac{32}{22.4} = 1.43$	

Co	22.1	$1.25 = \frac{28}{22.4}$	مكعب N. لذلك الكثافة = $\frac{\text{الوزن الجزيئ}}{22.4}$ كيلو جرام /م^3 N
H2	4.9	$0.0894 = \frac{2}{22.4}$	
N2	55.8	$1.25 = \frac{28}{22.4}$	

لذلك، كثافة غاز الفرن العالى بالمكونات في المثال (ب)

$$= \frac{1}{100}(1.25\times55.8+0.0894\times4.9+1.25\times22.1+1.43\times0.2+1.97\times17)$$

= 1.3 كجرام / م^3 (N)

الحرارة النوعية لخليط الغازات: (Specific Heat Of A Mixture of Gases)

الحرارة النوعية لخليط من الغازات عند ثبات الضغط يمكن كذلك حسابها على أساس الحرارة النوعية لمكونات هذا الخليط. كذلك يمكن تعيين الحرارة النوعية أما على أساس الحجمى أو على أساس الوزنى ووحداتها هى:

$$\frac{\text{كيلو كالورى}}{\text{كيلو جرام }^\circ\text{م}} \quad ، \quad \frac{\text{كيلو كالورى}}{\text{متر مكعب }^\circ\text{م}}$$

(C_p) تعنى الحرارة النوعية عند ضغط ثابت بين صفر°م، 500°م (على أساس الحجم).

(C_p) لبعض الغازات كالآتى:

المكونات	$C_p(KCl/m^{3\circ}C$
CO_2	0.48
O_2	5.334
N_2	0.319
CO	0.321
H_2	0.312

مع إعتبار الغاز العادم بالمكونات الآتية (بالحجم)

CO_2	%25
O_2	% 0.85
N_2	% 71

(C_p) للغازات العادمة الجافة =

$$= (0.319\times71+0.334\times0.85+0.48\times25)\frac{1}{100}$$

$$= 0.38 \frac{\text{كيلو كالورى}}{\text{م}^3\text{م}}$$

الفقد الحرارى فى الغازات العادمة : Heat Loss In The Flue Gases

إجمالى الفقد الحرارى فى الغازات العادمة هو مجموع الحرارة المحمولة بعيداً بواسطة الغازات العادمة الجافة والحرارة المحمولة بعيداً بالبخار فى الغازات العادمة والذى يسبب إحتراق الهيدروجين أو بسبب الرطوبة فى الوقود.

الحرارة المحمولة بواسطة الغازات العادمة الجافة لكل متر مكعب من الوقود المحترق $= (t_1-t_2)V\times C_p$

الحرارة المحمولة بواسطة البخار المتكون لكل متر مكعب من الوقود المحترق $= (h_{w1}-h_{s1})W$

لذلك الفقد الحرارى فى الغازات العادمة.

$= (h_{w1}-h_{s2})W+(t_1-t_2)\ C_p.V$

حيث :

V = حجم الغاز العادم الجاف لكل كيلوجرام من الوقود.

C_p= متوسط الحرارة النوعية للغازات العادمة الجافة.

t_2 = درجة حرارة الغازات العادمة التى تترك الفرن .

t_1 = درجة الحرارة العادية.

W = وزن الماء المتكون لكل كتر مكعب (م^3) من الوقود المحترق.

h_{s2}= إجمالى الحرارة للبخار المحمص (Super Heated) عند درجة حرارة (t_2).

h_{w1} = الحرارى المحسوسة للماء عند (t_1).

لذلك فإن الفقد الحرارى فى الغازات العادمة يمكن حسابه بالمعادلة السابقة بعد إستبدال القيم المختلفة ، التى سبق حسابها بالطريقة السابق توضيحها.

مثال:

غاز الفرن العالى له التحليل الحجمى الآتى:

$H_2 = 9$ %، $Co = 24$ %، $CH_4 = 2$ %، $CO = 6$ %، $O_2 = 3$ %، $N_2 = 56$ %

عين التحليل الوزني النهائي.

الحل:

التحليل النهائي معطى بالنسبة لمكونات العناصر وليس لمكونات المركبات الكيميائية. لذلك في هذه الحالة فإنه يتم تقدير التحليل النهائي بنسبة أوزان N_2, O_2, C, H_2 في الخليط.

N_2	O_2	H_2	C	التحليل الحجمي A %	مكونات الغاز
الاوزان النسبية للعناصر= A × الوزن الجزيئي للعنصر					
-	-	$18 = 2 \times 9$	-	9	H_2
-	$384 = 16 \times 24$	-	$288 = 12 \times 24$	24	CO
-	-	$8 = 4 \times 2$	$24 = 12 \times 2$	2	CH_2
-	$192 = 32 \times 6$	-	$72 = 12 \times 6$	6	CO_2
-	$96 = 32 \times 3$	-	-	3	O_2
$1568 = 28 \times 56$	-	-	-	56	N_2
$1568 = N_2$	$672 = O_2$	$26 = H_2$	$384 = C$		الإجمالى

نسبة المكون الوزنى $D = \frac{W}{\Sigma W} \times 100$	الوزن النسبى %	مكون العناصر
$\%14.45 = 100 \times \frac{384}{2650}$	384	C
$\%0.98 = 100 \times \frac{26}{2650}$	26	H_2
$\%25.35 = 100 \times \frac{672}{2650}$	672	O
$\%58.22 = 100 \times \frac{1568}{2650}$	1568	N_2
100	**2650**	الإجمالى

مثال:

الفحم ذو القيمة الحرارية 7100(cv) كيلو كالورى / كجرام له المكونات الآتية بالوزن: C = 0.78 , H_2 = 0.05 ,S = 0.02,N = 0.02، الباقى رماد. تم حرقه فى فرن باستخدام هواء زائد 50 ٪. الغازات العادمة الداخله إلى المدخمه عند 325°م، ودرجة حرارة الجو هى 15°م. إحسب نسبة الحرارة المحمولة بواسطة الغازات العادمة. بإفتراض إحتراق متقن. (C_p) للهواء =0.24 ، (C_p) للمنتجات الجافة للإحتراق = 0.25. الحرارة المحمولة لكل كجرام من الرطوبة فى الغازات العادمة هى 700 كيلو كالورى.

الحل:

حيث تم إفتراض الإحتراق الكامل، فإن كل C يحترق إلى CO_2 وكل H_2 إلى H_2O، S إلى SO_2.

لذلك، لكل كجرام واحد من الفحم فإننا نحصل على:

$0.78\times\frac{44}{12}=2.86$ كجرام من CO_2 (C يحترق إلى CO_2)

$0.05\times9=0.45$ كجرام من H_2O (H_2 يحترق إلى H_2O)

$0.02\times2=0.04$ كجرام من SO_2 (S يحترق إلى SO_2)

لذلك فإن الأكسجين المطلوب يكون بالآتى

$0.78\times\frac{32}{12}=2.078$ كجرام من O_2 (C يحترق إلى CO_2)

$0.05\times8=0.4$ كجرام من O_2 (H_2 يحترق إلى H_2O)

$0.02\times1=0.02$ كجرام من O_2 (S يحترق إلى SO_2)

الإجمالى = 2.498 كجرام من O_2.

لذلك :

2.498 كجرام أكسجين تكون مطلوبة لكل كجرام من الفحم للإحتراق الكامل ولكن الفحم يحتوى على 0.08 كجرام من الأكسجين.

لذلك :

O_2 المطلوب إمداده = 2.498 -0.08 = 2418 كجرام/كجرام من الفحم.

ومع 50٪ هواء زائد.

O_2 الحقيقي الذى تم إمداده = 2.418× 1.5= 3.627 كجرام/ كجرام من الفحم

وهذا يعطى N_2 الذى تم إمداده حقيقة

$$= 3.627 \times \frac{77}{23} = 12.14$$ كجرام/كجرام من الفحم

إجمالى الأكسجين الحر فى الغاز العادم

$= 3.627 - 2.418 = 1.209$ كجرام لكل كجرام من الفحم

إجمالى النيتروجين الحر فى الغاز العادم

$= 12.14 + 0.02 = 12.16$ كجرام / كجرام من الفحم

الحرارة المحمولة بواسطة المنتجات الجافة $(SO_2 + CO_2)$

$= (2.860 + 0.40) \times 0.25 \times (375 - 15) = 252$ كيلو كالورى / كجرام من الفحم

الحرارة المحمولة بواسطة بخار الماء:

$0.45 \times 700 = 315$ كيلو كالورى / كجرام من الفحم

الحرارة المحمولة بواسطة O_2 , N_2

$= (12.16 + 1.209) \times 0.24 \times (375 - 15)$

بإفتراض أن $C_p = (0.24)$

= 1115 كيلو كالورى / كجرام من الفحم

إجمالى كمية الحرارة المحمولة لكل كليوجرام من الفحم

$= 252 + 315 + 1115 = 1682$ كيلو كالورى / كجرام من الفحم.

مثال:

تم حرق الأوكتين بهواء زائد بنسبة 10٪ إحسب

أ. نسبة الهواء / الوقود بالوزن

ب. نسبة الهواء / الوقود بالحجم

ج. وزن الغاز العادم الجاف المتكون لكل وحدة من الفحم

د. جزئ الأكسجين فى الغاز العادم لكل وحدة وزن من الوقود.

هـ. جزئ بخار الماء في الغاز العادم لكل وحدة وزن من الوقود.

و. حجم الغاز العادم عند واحد ضغط جوى، عند 260 °م لوحدة الوزن من الوقود.

الجاذبية النوعية للأكتين يمكن إعتبارها 0.7.

الحل:

الأساس: واحد كيلو جرام جزئ من الأوكتين المحترق.

التفاعل:



$$C_8H_{18}+12.5O_2=8CO_2+9H_2O$$

أ. الأكسجين النظرى المطلوب = 12.5 كجرام جزئ (Kmol)

إمداد الأكسجين بهواء زائد 10٪

$= 12.5\times1.1 = 13.75$ كجرام جزئ =

$= 75\times13\times32 = 440$ كجرام

إمداد النيتروجين بالهواء

$= 13.75\times\frac{79}{21} = 51.73$ كجرام جزئ

$= 51.73\times28 = 1448.4$ كجرام

كمية الإمداد بالهواء = 13.75 + 51.73 = 65.48 كجرام جزئ

= 1888.4 كجرام

الوزن الجزيئي للوقود = 114

$$\frac{\text{وزن الهواء}}{\text{وزن الوفود}}=\frac{1888.4}{114}=16.56$$

ب. الجاذبية النوعية للأوكتين = 0.7

كثافة الأوكتين = 0.7 كجرام / سم^3 = 700 كجرام / م^3

حجم الوقود = $\frac{114}{700}=0.163$ متر مكعب

على فرض سلوك مثالى للغاز، حجم الهواء عند الضغط والحرارة العادية

$= 65.48\times22.4 = 1466.75$ متر مكعب.

$$\frac{\text{حجم الهواء}}{\text{حجم الوقود}}=\frac{1466.75}{0.163}=4998.5$$

ج. الأكسجين الزائد: الأكسجين الذى تم إمداده -- الأكسجين المستخدم

$= 13.75-12.5 = 1.25$ كجرام جزئ

التحليل للغاز العادم الجاف

المكون	الكمية كجرام جزئ	الكمية بالجرام
CO_2	8.00	352
O_2	1.25	40
N_2	51.73	1448.4
الإجمالي	**60.98**	**1840.4**

$$\frac{\text{وزن الغاز العادم}}{\text{وزن الوقود}} = \frac{1840.4}{114} = 16.4$$

د. $$\frac{\text{جزيئات O2 في الغاز}}{\text{وزن الوقود}} = \frac{12.5}{114} = 0.011$$ جزئ

هـ. $$\frac{\text{الوزن الجزيئي لبخار الماء في الغاز العادم}}{\text{وزن الوقود}} = \frac{9}{114} = 0.079$$

و. جزئيات الغاز العادم (رطب)

$$9 + 60.98 = 69.96$$

بتطبيق قانون الغاز المثالى الذى يخضع لقانون بويل فى كل الظروف عند 260م وضغط جوى واحد.

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{69.98 \times 0.08206 \times (260 + 273)}{1} = 3060\, m^3$$

$$\frac{\text{حجم الغاز العادم (رطب)}}{\text{وزن الوقود}} = \frac{3060.8}{114} = 26.85$$

مثال:

فرن يتم إشعاله بالغاز الطبيعي الذى يتكون من الهيدروكربونات (الغازات الخاملة مهملة ومركبات الكبريت. تحليل أورسات للغاز العادم أعطى الآتى:

$CO_2 = \%\ 9.5$, $O_2 = \%2$, $CO = \%\ 1.8$

أ. ما هى النسبة الجزيئية لصافى الهيدروجين إلى الكربون فى الوقود.

ب. ما هى نسبة الهواء الزائد المستخدم.

الحل:

الأساس 100 كجرام جزئ من الغاز العادم الجاف.

من تحليل أوسات

جزئ N_2 = 100-(2+1.8+9.5)= 86.7

ميزان الأكسجين.

O_2 تم إمداده بالهواء = $\frac{21}{79}\times 86.7 = 23.05$ كجرام جزئ

O_2 وجد فى الغاز العادم (جاف)

= $9.5 + \frac{1}{2}\times 1.8 + 2 = 12.4$ كجرام جزئ

O_2 لم يتم حسابه =23.05–12.4= 10.65 كجرام جزئ

= O_2 تفاعل مع H_2

أ. جزيئات الهيدروجين التى تفاعلت

= $10.65 \times 2 = 21.3$

كمية الكربون = 9.5+1.8=11.3 كجرام ذرة (Kg Atom)

$$\frac{\text{جزئيات H2}}{\text{ذرات C}} = \frac{21.3}{11.3} = 1.885$$

ب. جزيئات O_2 اللازمة لإكمال الإحتراق

= الجزئ المطلوب لـH_2 + جزئ مطلوب لـ C

= 10.65 + 11.3 = 21.95

كمية الأكسجين الزائد = 23.05- 21.95 = 1.1 (1.1 Mol)

٪ الهواء الزائد = ٪ الأكسجين الزائد = $\frac{1.1}{21.95}\times 100 = 5$

مثال:

فرن يتم إشعاله بالغاز الطبيعي الذى يتكون كليه من الهيدروكربونات (إجمالى الغازات الخاملة ومركبات الكبريت). تحليل أورسات للغاز العادم أعطى الآتى:

CO_2 = 9.5% , O_2 = 2 % , CO = 1.8 ٪

أ. ما هى النسبة الجزيئية للهيدوجين الصافى إلى الكربون فى الوقود.

ب. ما هى نسبة الهواء الزائد المستخدمة.

الحل:

الأساس: 100 كجرام جزئ من الغاز العادم الجاف.

من تحليل أورسات :

جزئ N_2 = $86.7=(1.8+2+9.5)-100$

ميزان الأكسجين =

O_2 تم إمداده بالهواء = $23.05=\frac{21}{79}\times 86.7$ كجرام جزئ (K mol)

O_2 فى الوقود الغازى (جاف)

$=9.5+\frac{1}{2}\times 1.8+2=12.4$ كجرام جزئ

O_2 لم يتم حسابه = $10.65 = 12.4-23.05$ كجرام جزئ

= O_2 تفاعل مع H_2

أ. جزيئات الهيدروجين التى تفاعلت

$=2\times 10.65=21.3$

كمية الكربون = $\frac{\text{جزئيات H2}}{\text{ذرات C}} = \frac{21.3}{11.3}=1.885$

ب. جزيئات O_2 اللازمة لإتمام الإحتراق

= جزئ لأزم لـH_2 + جزئ لأزم لـ C

$= 10.65 + 11.3 = 21.95$

كمية هواء الأكسجين الزائد $=23.05-21.95= 1.1$ (Mol 1.1)

نسبة الهواء الزائد = ٪ O_2 الزائد = $\frac{1.1}{21.95}\times 100=5$

مثال:

غلاية يتم إشعالها باستخدام 200 كجرام/الساعة من غاز الهيدروكربون المشع (C_nH_m) عند الضغط الجوى وعند 20°م. التحليل الجاف للغاز العادم الذى يترك الغلايه عند الضغط الجوى، 300°م هو:

$CO_2 = 12$ ٪ , $O_2 = 3$٪ , $N_2 = 85$ ٪ . قدر معادلة الوقود. وإجمالى معدل التدفق الحجمى للغاز .

الحل:

100 كجرام جزئ من الغاز العادم الجاف.

ميزان الأكسجين =

O_2 في الغاز العادم = 85 كجرام جزئ

O_2 تم إمداده بالهواء = $\frac{21}{79}\times 85 = 22.5$ كجرام جزئ

O_2 في الغاز العادم = O_2 في شكل $CO_2 + O_2$ في شكل O_2

= 12+ 3=15 كجرام جزئ

O_2 لم يتم حسابه = O_2 تفاعل مع H_2

$= 22.5 - 15.00 = 7.59$ كجرام جزئ

H_2 تفاعل $= 7.59\times 2 = 15.18$كجرام جزئ

كمية الكربون = 30.36H كجرام

معادلة وقود الغاز (الهيدروكربون غاز)

كمية الكربون = 12 كجرام ذرة

كمية الكربون 30.36 = H كجرام ذرة

$$= \frac{\text{ذرة } H}{\text{ذرة } C} = \frac{10.36}{2} = 2.53$$

نظراً لأن النسبة تزيد عن 2.00 ، لذلك تكون المعادلة

(Para ffin) أي ($C_n H_{2n+2}$)

$$\frac{1}{2.53} = \frac{2}{2n+2}$$

$$\therefore n = 4 - 3.77$$

لذلك فإن الوقود هي (C_4H_{10}) (n-Butane)

كمية الوقود = $\frac{200}{58} = 3.45$ $\frac{\text{كجرام جزئ}}{\text{الساعة}}$

على فرض قانون الغاز (بويل)

فإن الحجم عند 20°م وواحد ضغط جزى هو

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{3.45\times 0.08206\times(273+20)}{1}$$

$$= 82.95\, m^3/hr$$

5

الفصل الخامس

تحليل الغاز وتعيين القيمة الحرارية

Gas Analysis and Calorific Value Deter Determination

تحليل الغاز يشمل الغاز العادم وكذلك الوقود الغازى. تحليل الغاز العادم يساعد فى إيجاد الوقود الذى لم يحترق (يوجد CO فى الغاز العادم) والهواء الزائد (بوجود O_2 فى الغاز العادم) المستخدم فى الإحتراق وكذلك تسربات الهواء عند نقاط مختلفة فى نظم الإحتراق.

تحليل الوقود الغاز يساعد فى معرفة المكونات والقيمة الحرارية وكذلك المكونات السامة (مثل CO) والعدوانية (مثل H_2S, SO_3 , SO_2 .. إلخ) الموجودة فى غازات الوقود.

تعيين القيمة الحرارية لغازات الوقود يعطى القيم المباشرة والتى يمكن مراجعتها بتحليلها طبقاً للقيمة الحرارية (C.V).

تحليل الغاز العادم (Flue Gas Analysis)

الجهاز المستخدم للتحليل الروتيني للغاز العادم هو جهاز أورسات (Orsat Analysis) الغازات التى يتم تقديرها عادة هة CO_2 , O_2 , CO.

جهاز أورسات يتكون من سحاحه غاز مغلق بالماء (Water-Jacketed Gas Burette) ومتصلة بخط أنبوب مشترك وإغلاق الوصلات إلى ثلاث ماصات (Pipettes) محتويه على التوالى محاليل البوتاسا الكاوية، (Alkali Pyrogallol) كلوريد النحاسوز النشادرى لإمتصاص CO_2 , O_2 , CO.

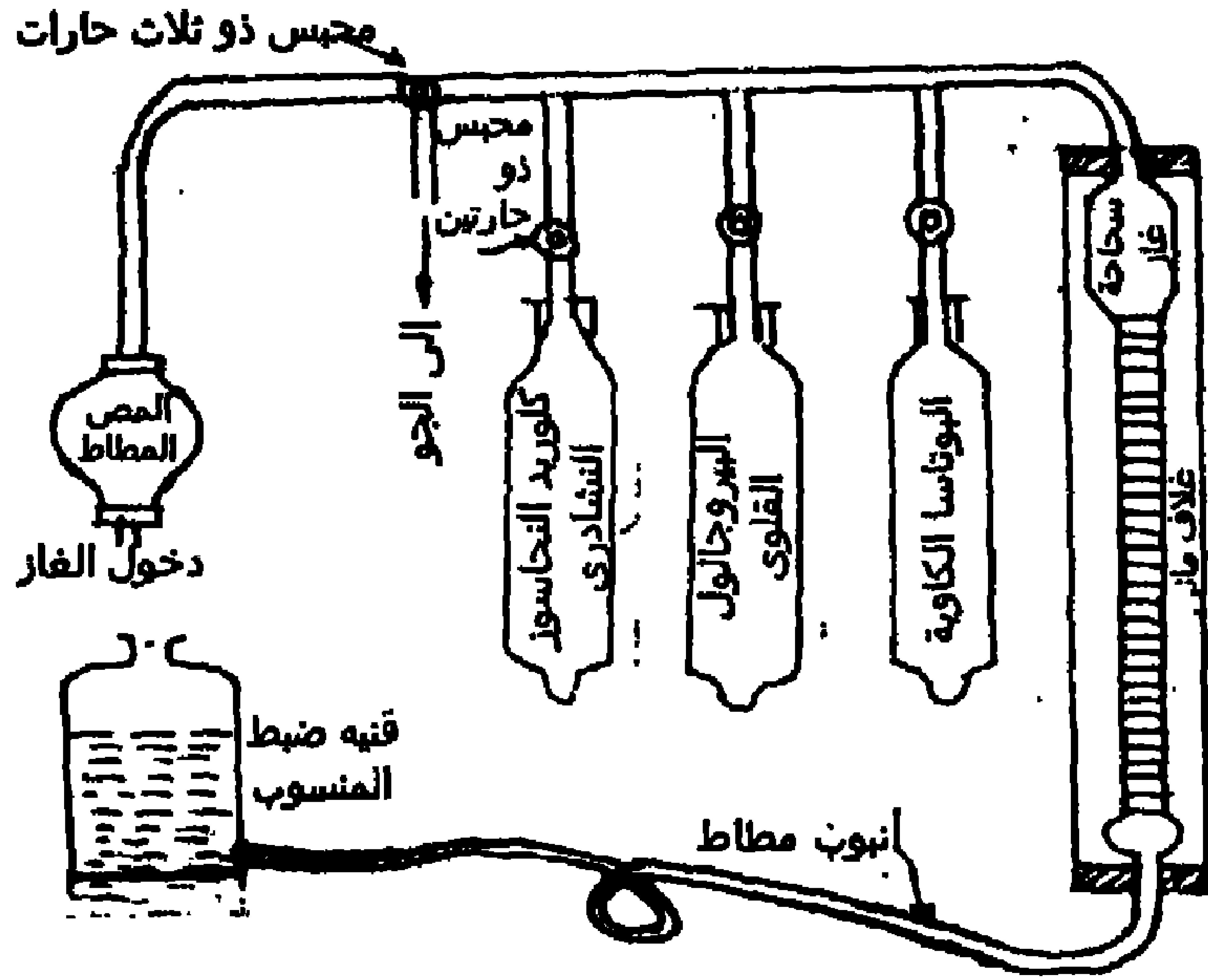
يتم توصيل فنيه تسوية المنسوب (Leveling Bottle) إلى قاعدة سحاحة الغاز لإمكان أخذ القراءات عند ضغط ثابت وللإستخدام فى نقل الغاز إلى ومن الماصة المدرجة (Pipette).

قنينه تسوية المنسوب، الأنابيب ، سحاحة الغاز يتم ملؤهم بالماء الحامضى (Acidulated Water) وتوصيلهم إلى الغاز العادم خلال جهاز المص (Aspirator).

يتم عندئذ ضخ الغاز العادم خلال تلك الأجزاء (حيث يتحرك خلال قنينه تسوية المنسوب، تعلق منخفضة) حتى الغاز فى السحاحة يكون ممثلاً للغاز العادم.

يتم عندئذ تبريد سحاحة الغاز، وضبط الحجم والضغط بحيث أن الحجم يقرأ أصغر عندما تكون مستويات الماء فى قنينه ضغط المنسوب وفى سحاحة الغاز عند نفس المستوى، عند الصفر.

الغاز يتم عندئذ تمريره فى بصيله البوتاس (Potash Bulb) لمدة دقيقتين والعودة فى سحاحة الغاز، الضغط يتم ضبطه إلى الجوى بواسطة قنينه تسوية المنسوب. شكل (52).



شكل (52): جهاز أورسات لتحليل الغاز

هذه الطريقة يتم تكرارها حتى يظل الحجم ثابتاً. بنسبة CO_2 هى القراءة الجديدة لسحاحة الغاز. نسبة O_2 , CO يتم قياسها بالتالى بنفس الطريقة، باستخدام البيروجللول القلوى لإمتصاص O_2 كلوريد النحاسوز النشادرى لإمتصاص CO.

تحليل الوقود الغازى : Fuel Gas Analysis

الوقود الغازى (غاز الفرن العالى، غاز فرن الكوك، غاز الإنتاج... إلخ) يحتوى H_2 , CH_4, $C_{2-5}H_5$ (هيدروكربونات غير مشبعه) كذلك جزء من N_2, O_2 , CO_2, CO . يتم عمل التحليل الكامل للوقود الغازى بواسطة جهاز هالدين (Haldane Aparatus) او جهاز أوسات المطور.

فى جهاز أورسات المطور يوجد ثلاث أو أربع بصيلات إمتصاص لإمتصاص O_2 , CO_2 ، الهيدروكربونات الغير مشبعه ($C_{2-5}H_5$) و CO على التوالى بواسطة (KOH),(Pyrogallol)، ماء البروم، ومحلول كلوريد النحاسوز النشادرى. بعد معرفة نسب $C_{2-5}H_5$, O_2 , CO_2 , CO، فإن الخطوة التالية هى لمعرفة كمية CH_4, H_2 فى الغاز العادم، لذلك فإن الغاز المتبقى يتم تمريره فوق أكسيد النحاسيك (CuO) (Cupric Oxide) الساخن عند 80°م. الهيدروجين فى وجود (CuO) يتحول إلى بخار الماء ($H_2+\frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$)، يتم عندئذ تبريد الغاز بحيث أن بخار الماء يتم تكثيفه. الخفض فى حجم الغاز بسبب تكثيف بخار الماء يعطى نسبة الهيدروجين

فى الغاز. (لأن حجم واحد من الهيدروجين ينتج حجم واحد من بخار الماء). بعد ذلك يتم تعيين محتوى الغاز من (CH_4) بتمرير الغاز فوق (CUO) الساخن الموجود فى نفس الأنبوب ولكن عند 850°م. هنا الميثان فى الغاز يتفاعل مع اكسجين (CuO) ويتكون H_2O, CO_2 .



$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2CO + 2H_2O$$

يتم تبريد الغاز بحيث يتم تكثيف بخار الماء، CO_2 الناتج يتم إمتصاصه فى محلول (KOH) الموجود فى البصيلة الأولى. حيث أن حجم واحد من CH_4 يعطى حجم واحد من CO_2، لذلك فإن الخفض في حجم الغاز بسبب إمتصاص CO_2 يعطى نسبة الميثان فى الوقود الغاز. النيتروجين يتم تعيينه بالفرق.

بهذه الطريقة يتم إيجاد CO_2 , O_2 الهيدروكربونات الغير مشبعة، CH_4, H, CO فى الوقود الغازى.

تعيين القيمة الحرارية : (Determination of Calorific Value)

القيمة الحرارية للوقود الغازى يتم تعيينها أما بجهاز قياس السعر الحرارى (Boy's Calorimeter) أو (Junker's Calorimeter) كالآتى :

1. تعيين القيمة الحرارية بواسطة (Boy's Gas Calorimeter)

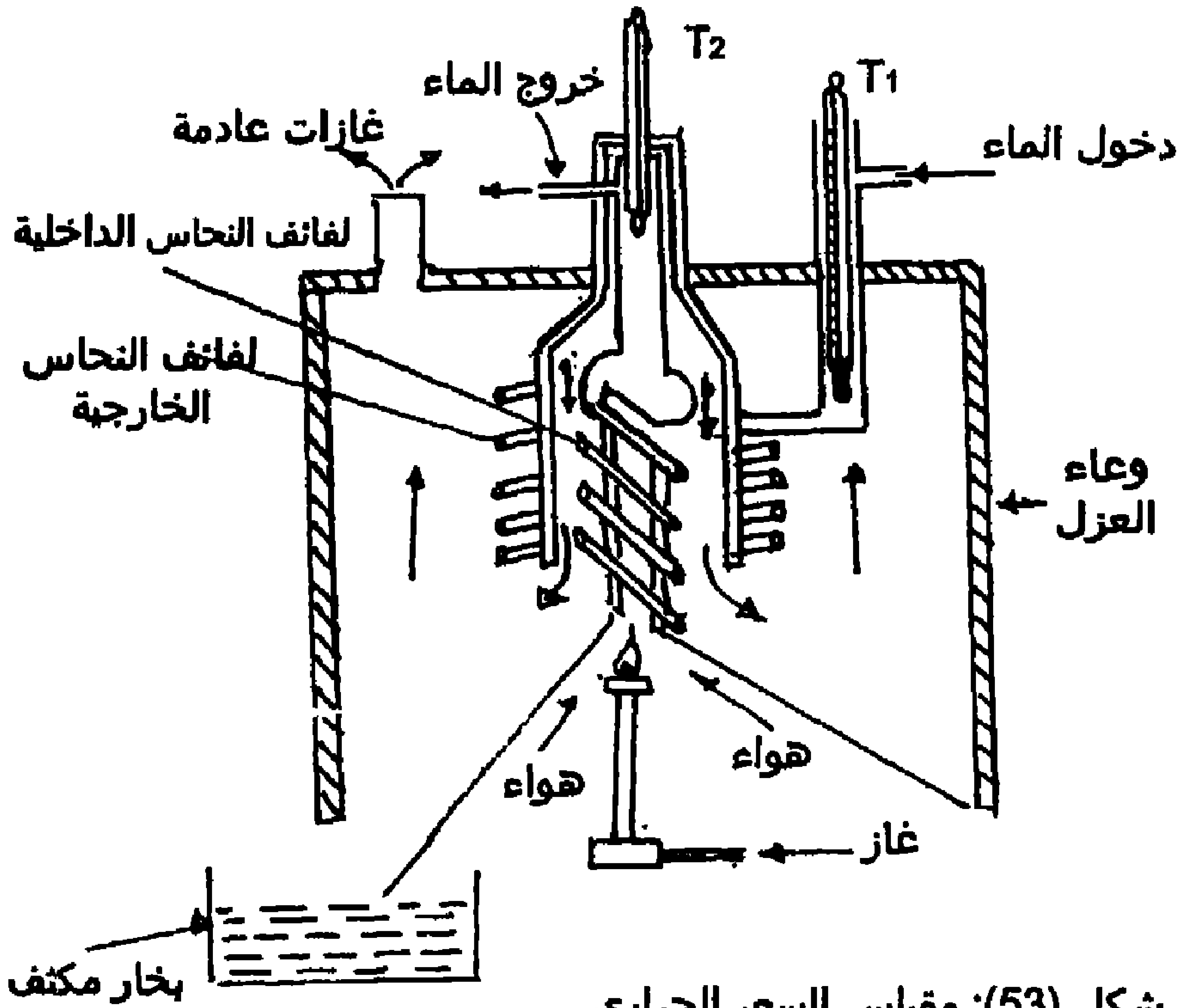
يستخدم هذا الجهاز لتعيين القيم الحرارية للوقود الغازى وكذلك الوقود السائل الذى يسهل تبخيره.

وهو يتكون من موقد الذى يمكن أن يتم فيه حرق حجم معلوم من الغاز عند ضغط معلوم وبمعدل ثابت. حول الموقد ، توجد مدخنه، غرفة إحتراق لها مواسير من النحاس فى شكل لفائف (Coiled) فى الداخل وكذلك فى الخارج. يتم تمرير الماء بمعدل ثابت عند أعلا اللفائف الخارجية، ويترك الغرفة عند قمة اللفائف الداخلية (Inner Coil). يتم تجهيز إثنين من الترمومترات T_1,T_2 لتسجيل درجة الحرارة للماء الداخل والخارج على التوالى. كل التجهيز يكون محتوياً فى غرفة معزولة.

يستمر تدوير الماء والوقود الغازى المحترق بمعدل ثابت لحوالى 15 دقيقة لتسخين جهاز قياس السعر الحرارى (Calorimeter). عند تمام تسخين جهاز قياس السعر الحرارى، يتم ضبط معدلات الوقود الغازى والماء بحيث أن الماء الخارج يترك الجهاز قريباً من الضغط الجوى. الحرارة الناتجة بإحتراق الوقود الغازى تنقل إلى الماء فى لفات المواسير من النحاس والبخار

المتكون (فى حالة حدوثه) خلال الإحتراق يتم تكثيفه إلى الماء والذى يتم تجميعه عند الوصول إلى حالة الإستقرار. يتم عمل الملاحظات الآتية:

- حجم الغاز (الوقود) المحروق عند درجة حرارة وضغط معين فى وقت معين. حجم الغاز المحروق يتم عندئذ تحويله إلى درجة الحرارة والضغط العادى (NTP).
- كمية الماء المار خلال لفات المواسير فى نفس الوقت.
- الإرتفاع فى درجة الحرارة.
- وزن الماء المكثف.



شكل (53): مقياس السعر الحرارى بطريقة غاز بويز

حساب القيمة الحرارية الكلية:

Calculation Of Gross Calorific Value

بفرض حجم الغاز المحترق عند درجة الحرارة والضغط العادى NTP فى زمن V=T وزن

الماء المار خلال لفات المواسير فى الزمن	W =
درجة حرارة الماء الداخل	t_1=
درجة حرارة الماء الخارج	t_2=

وزن الماء المكثف (بخار) $W=$

بفرض أعلا قيمة حرارية للوقود $C=$

الحسابات:

الحرارة الممتصة بتدوير الماء = $W\ (t_1 - t_2)$

الحرارة الناتجة بإحتراق الوقود = $C \times V$

الحرارة المنتجة = الحرارة الممتصة

$$(t_1 - t_2)W = V \times C$$

$$\frac{(t_1 - t_2)W}{V} = C$$

حساب أدنى قيمة حرارية (الصافية) (Net C.V)

وزن الماء المكثف من واحد متر مكعب من الغاز

$$= \frac{W^1}{V}$$

الحرارة الكامنه للبخار فى كل متر مكعب من الغاز = $\frac{587 \times W^1}{V}$

الحرارة الكامنة للبخار = 587 كيلو كالورى / كجرام

∴ أدنى قيمة حرارية للوقود = أعلا قيمة حرارية – الحرارة الكامنه للبخار فى كل متر مكعب من الغاز

$$\frac{587 \times W^1}{V} - C =$$

مثال:

البيانات الآتية تم الحصول عليها فى تجربة مقياس القيمة الحرارية للغازية بواسطة جهاز (Boy's) وهى:

حجم الغاز المستخدم = 0.1 متر مكعب عند درجة الحرارة والضغط العادى (NTP)

وزن الماء الذى تم تسخينه = 25 كيلو جرام

درجة حرارة الماء الخارج = 33°م.

وزن البخار المكثف = 0.25 كيلو جرام.

إحسب أعلا وأدنى قيمة حرارة لكل متر مكعب عند درجة حرارة والضغط العادى بإفتراض

أن الحرارة المنطلقة فى تكثيف بخار الماء وتبريد المكثف هى 580 كيلو كالورى / كيلو جرام.

الحل:

V = 0.1 متر مكعب

W^1 = 0.025 كيلو جرام

W = 25 كيلو جرام

t_1,t_2 = 33 − 20 = 13 °م.

الحرارة الكامنة للبخار = 580 كليو كالورى / كيلو جرام

الآن ، أعلا قيمة حرارية (C).

$$C = \frac{W(t_2 - t_1)}{V} = \frac{25 \times 13}{0.1} = 3250 Kcol / m^3$$

وأدنى قيمة حرارية

$$= C - \frac{W^1 \times \text{الحرارة الكامنه للبخار}}{V}$$

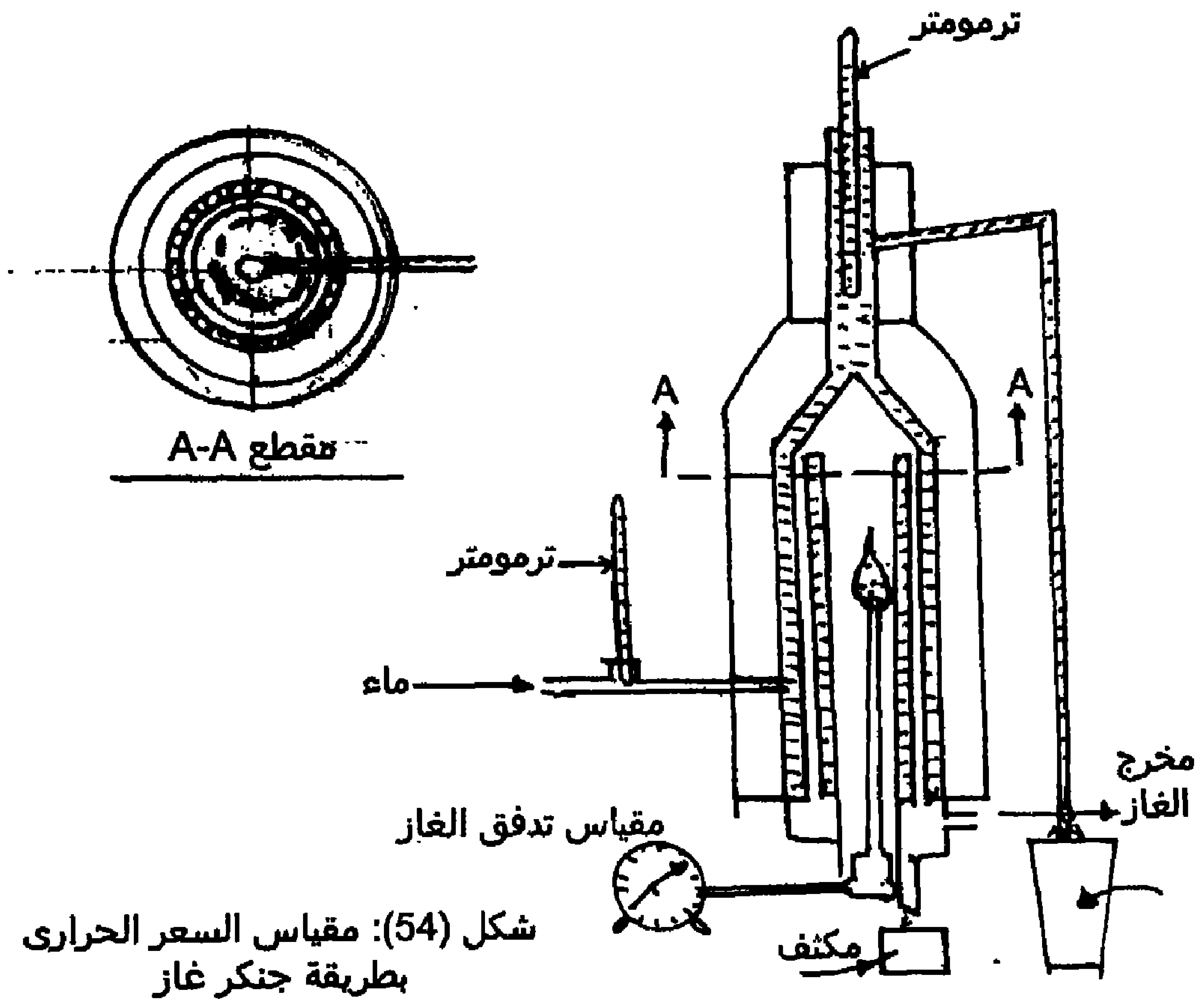
$$= 3250 - \frac{0.025 \times 580}{0.1} = 3250 - 145 = 3105 Kcal / m^3$$

Jun Ker's Calorimeter.

مقياس الطاقة الحرارية جنكر يتكون أساساً من غرفة إحتراق داخلية التى يتم فيها إحتراق الغاز. هذه الغرفة محاطة بواسطة غلاف من الماء الذى يمر خلاله عدد من الأنابيب تسمى المداخن (Flues). الغاز عند الإحتراق يسخن الغلاف المائى ثم يمر أسفل مصارف الغاز فى الغلاف المائى، بذا يتم ضمان تمام إنتقال حرارة الإحتراق إلى الماء.

الماء يدخل مقياس الحرارة بالكالورى خلال ضغط رأسى ثابت ودرجة حرارته يتم تسجيلها بواسطة الترمومتر. الغاز المطلوب تعيين قيمته الحرارية يمر خلال عداد الغاز، والذى يسجل حجمه، ويحترق فى الموقد. المنتجات الساخنه للإحتراق تتحرك إلى أعلا فى الغرفة ثم إلى أسفل خلال مصارف الغازات (Flues) المتوفرة فى الغلاف المائى (Water Jacket) ثم تنصرف خلال المخرج. الترمومتر عند المخرج يبين درجة حرارتها والتى تكون قريبه من درجة حرارة الغرفة ما أمكن ذلك بحيث أن الإنتقال الحرارى إلى الماء يكون تاماً. الماء الذى يتحرك فى إتجاه معاكس لإتجاه الغازات فى مصاريف صرف الغاز، ينصرف من الجزء العلوى. درجة حرارته وحجمه

ستم تسجيلهم. الماء الذى يتكون بتكثيف البخار يتم جمعه كذلك حجم الغاز المحترق خلال التجربة يتم تحويله إلى الحجم عند درجة الحرارة والضغط العادى (NTP) (عند صفر°م ، 760 مليميتر زئبق). معرفة وزن الماء المتدفق والإرتفاع في درجة حرارته، فإن الحرارة التى أعطاها الغاز يتم معرفتها. يتم عندئذ الحصول على القيمة الحرارية الكلية بقسمة الحرارة المعطاه بواسطة حجم الغاز الذى تم تصميمه. للحصول على القيمة الحرارية الصافية (Net) فإنه يتم وزن الماء المكثف وضرب الوزن فى الحرارة الكامنه لتبخير الماء. هذه يتم طرحها من الحرارة الكلية والنتيجة يتم قسمتها على الحجم الصحيح للغاز.



شكل (54): مقياس السعر الحرارى بطريقة جنكر غاز

6

الفصل السادس

إحتراق طبقة التميؤ

Fluidized Bed Combustion

في إحتراق طبقة التميؤ فإن طبقة حبيبات الفحم تظل متحركة /تغلى(أى في حالة تميؤ). حبيبات الفحم التى تدخل غرفة الإحتراق يتم تقليبها والرماد يتم حمله بواسطة هواء الإحتراق القادم من أسفل. تظل طبقة الفحم في حالة غليان بحيث أن يكون الإلتصاق بين الهواء والوقود في حالة أفضل ويكون الإحتراق سريعاً.

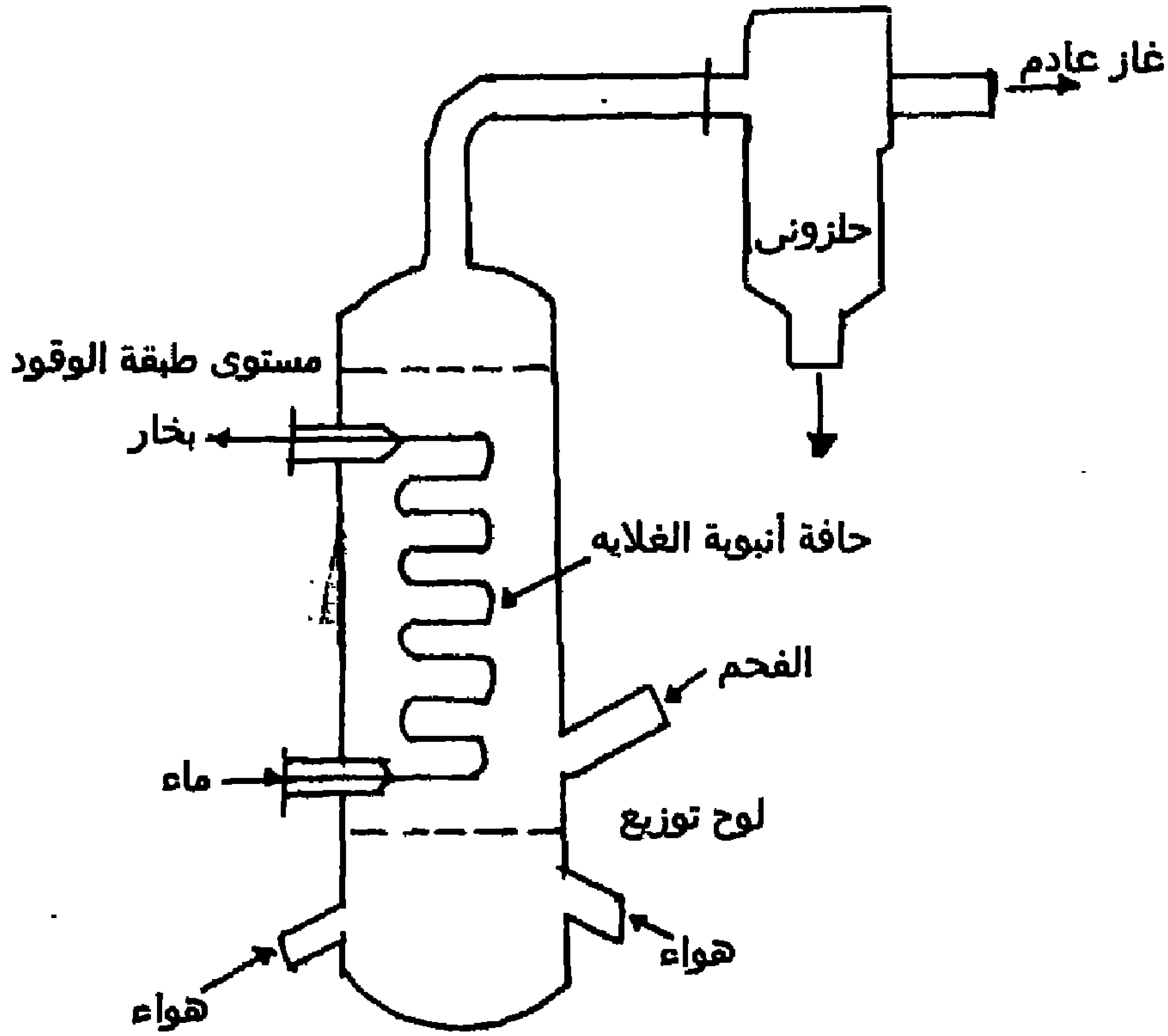
إحتراق طبقة التميؤ يتم إستخدامه حالياً في الغلايات الحديثة والتى تكون كفاءتها الحرارية لتحويل الفحم إلى كهرباء حوالى 36 ٪ مقارنة بـ30٪ في حالة الغلايات التى تعمل بإحتراق الفحم المطحون.

فى حالة الغلايات التى تعمل بالفحم المطحون تظهر مشاكل الإحتكاك والتآكل وتكوين رواسب منصهرة. بجانب الإستثمارات الرأسمالية المرتفعة فإن تكاليف الطحن هى كذلك مرتفعة. ولكن فى الإحتراق بطبقة التميؤ ، يكون سطح الإنتقال الحرارى فى حالة إلتصاق مباشر مع طبقة التميؤ وبذلك القدرة على تجنب كثيراً من سلبيات إحتراق الوقود المطحون وتقليل تكلفة توليد البخار والطاقة.

فى غلايات طبقة التميؤ، تتم تغذية الفحم/الوقود وحجم حبيبات كبير نسبياً (مقارنة بإشعال غلايات الفرن العالى) إلى طبقة التميؤ الساخنه ذات حبيبات الرماد. تظل الطبقة عند 800-900 °م ويتم وضع أسطح الإنتقال الحرارى ملتصقة مباشرة مع الطبقة. استخدام حبيبات خشنه يقلل من التكلفة العالية ومشاكل التآكل والإحتكاك التى تحدث فى حالة الوقود المطحون. استخدام درجة حرارة إحتراق منخفضة يبعد تكون الخبث ومشاكل التآكل الناتجة عن التشغيل عند درجة الحرارة العالية.

الرماد المتطاير (Fly ash) الناتج يكون ذو طبيعة لينه وبذا يقلل من مشاكل إحتكاك الرماد المتطاير فى محطات الغلايه.

مخطط يوضح مبادئ الإحتراق بطبقة التميؤ فى الشكل رقم (55).



شكل (55): مخطط الحرق بطبقة التميؤ

معالم ظاهرة نظم الإحتراق بطبقة التميؤ كالآتى:

- غرفة الإحتراق تكون فى شكل أسطوانة عمودية أو غلاف مربع، الفحم المطحون (-1.5 مليميتر) يتم حمله فوق موزع مثقب (أحياناً مبرد بالماء) والتميؤ بهواء الإحتراق الذى يتم ضخه خلال لوح التوزيع.
- تتم التغذية المستمرة بالوقود خلال المدخل فوق لوح التوزيع .
- الإحتراق يوفر الحرارة لتوليد البخار.
- يمكن غمر مواسير الغلايه مباشرة فى طبقة الوقود.
- غرفة الإحتراق تكون مبطنة بالحراريات : قيسون (Casing) بالتبريد المائى مركب داخل غلاف ضغط بقطر 1.8 مليميتر (السليكونات لإزالة الغبار).

مميزات الإحتراق بطبقة التميؤ :

- إنخفاض التكاليف الرأسمالية وتكاليف التشغيل.
- الإنتقال الحرارى العالى إلى مواسير الغلاية.

- إنخفاض تكون NOX بسبب درجة حرارة اللهب المنخفضة (800–900°م).
- الإحتراق بطبقة التميؤ المضغوط يتطلب فضاء أقل كثيراً.
- قلة الهواء الزائد المطلوب (فقط 5 – 10٪) مقارنة بالوقود المطحون فى حالة استخدامه فى إشعال الغلايات والذى يتطلب هواء زائد من 20–25٪، بما ينتج عنه وفر إقتصادى بسبب انخفاض الفقد فى الحرارة الملموسة مع الغازات العادمة.
- إنخفاض أكاسيد الكبريت فى الغازات العادمة حتى فى حالة إستخدام وقود ذو محتوى مرتفع من الكبريت بسبب إنخفاض درجة حرارة التشغيل.
- الغلاية التى تعمل بطبقة التميؤ منخفضة التكلفة قادرة على إعطاء ما لا يقل عن نفس الكفاءة (حوالى 80٪) التى يمكن الحصول عليها فى حالة الغلايات التى تعمل بإشعال غاز الفرن الحالى.
- يمكن حرق الفحم ذو الرتبة المتدنيه بكفاءة هذا النظام .
- المعدل العالى الذى عنده يمكن نقل الحرارة من الطبقة لرفع البخار أو لأغراض أخرى يمكن من إستخدام غلايا أو أفران أصغر.
- صعوبة تأثير الإحتراق بنوع الفحم، المحتوى من الرماد أو الرطوبة بسبب صغر تركيز الفحم فى الطبقة. الفحم المحترق يكون محاطاً بمادة خاملة بحيث لا يكون هناك استعداد لإلتصاق حبيبات الفحم الكبيرة مع بعضها البعض . وقود الفحم ذو النوعية المتدنية الذى إعتبر أنه غير مناسب فى الإحتراق يمكن إستخدامه فى الحرق فى طبقة التميؤ.
- مقارنة لإشعال الوقود المطحون فإن الإحتراق باستخدام طبقة التميؤ يمكنه إستخدام الفحم من الأنواع المتاحه تجارياً بدون معالجة لاحقة.
- درجة الحرارة فى الإحتراق بطبقة التميؤ (عند أقصاها 950°م) تكون أقل من تلك فى نظم أخرى (مثل ما يزيد عن 1200 °م فى محطات الغلايات التى تعمل بالوقود المطحون). إنبعاث المواد المنتجة للرواسب يكون لذلك قليلاً مقارنة بالغلايات الأخرى وإنخفاض الترسيبات على المواسير. إنخفاض درجة حرارة الإحتراق تمنع حدوث المشاكل المتعلقة بإنصهار الرماد.
- سرعة الحبيبات تكون أقل من تلك التى عندها يحدث برى للصلب بالتصادم. فى

الحقيقة برى السطح بإزالة الأوساخ (Scouring) بفعل الحبيبات المتحركة يمكن أن يفيد فى منع تراكم الرواسب على المواسير.

- إستواء درجة الحرارة يمكن من التحكم الآلى بدقة أكبر مقارنة بنظم إحتراق الفحم الأخرى.

عيوب الإحتراق بطبقة التمبؤ:

- بسبب إرتفاع معدلات الإنتقال الحرارى فى الطبقة ، فإن المواسير المغمورة للغلاية يكون من السهل تلفها عند درجات حرارة الطبقة الزائدة والمفرطة، على الجانب الآخر، فإن الإحتراق يتوقف فى حالة إنخفاض درجة الحرارة كثيراً. لذلك فإن الطبقة يجب أن تظل خلال حدود ضيقة لدرجة الحرارة، وهذا يعقد عملية إحكام الإنتاج. يكون من الضرورى إحكام معدل إمتصاص الحرارة وكذلك معدل الإشعال.
- التغير القليل نسبياً يمكن قبوله فى سرعة هواء التميؤ. فإذا كان عالياً جداً، يكون إحتجاز الجسيمات عالياً والفقد بسبب الكربون الغير محترق يكون مرتفعاً. وإذا كان منخفضاً جدا، فإن التميؤ يصبح بطئ وراكد، المادة الخشنة فى الطبقة تنفصل، وتحدث إعاقة وإفساد للإنتقال الحرارى. إذا كان عند التقليب (Turn Down)، يظل تدفق الهواء ثابتاً بينما يقل تدفق الوقود فإن الهواء الزائد يصبح مرتفعاً بشكل غير مقبول.
- هواء الإحتراق يجب إدخاله عند ضغط عالى بهدف إحداث تميؤ للطبقة. بالنسبة للنظم المضغوطة يكون من الضرورى هواء إحتراق عالى الضغط.

غلاية طبقة التميؤ الدورة:

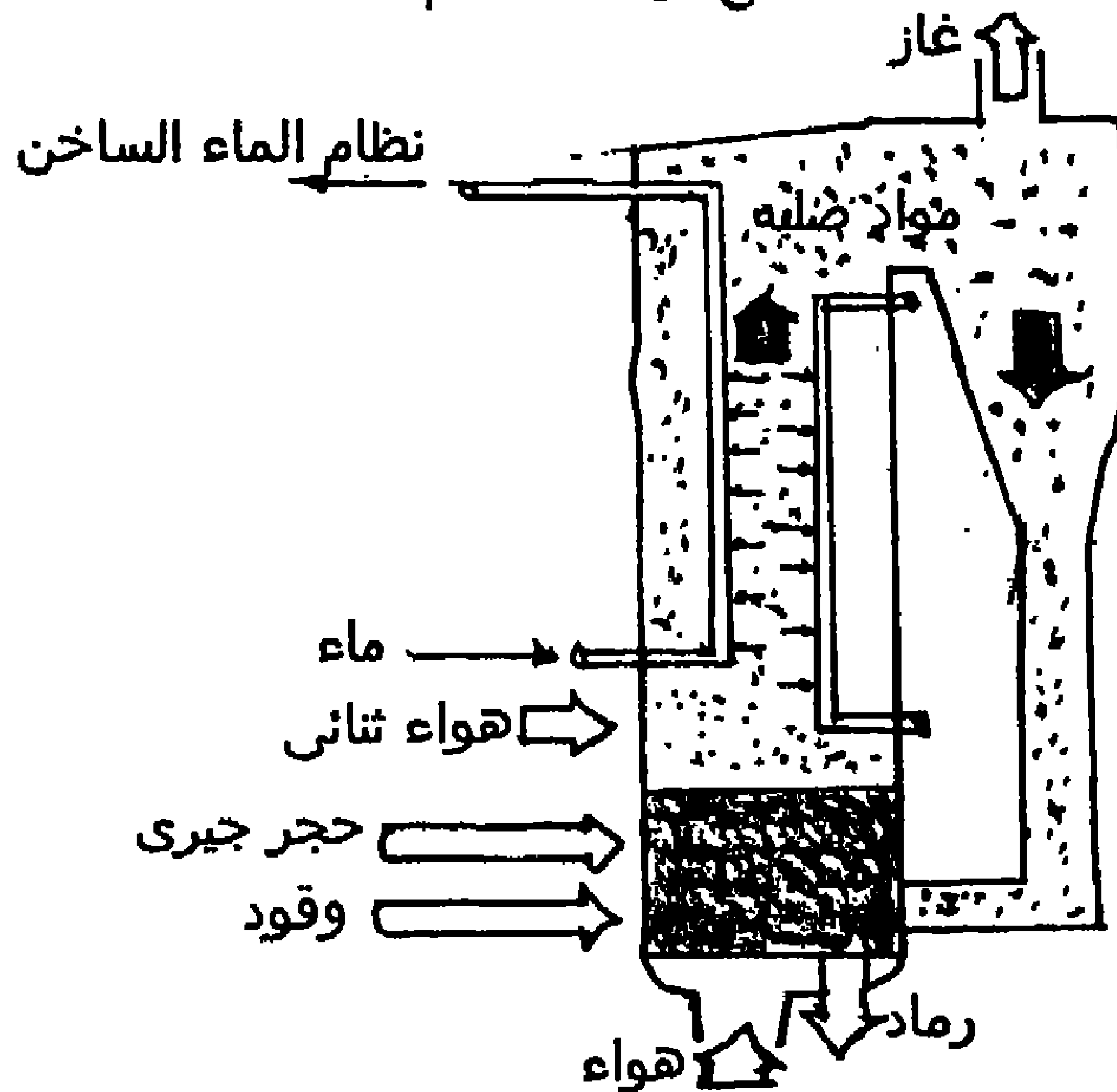
Circulating Fluidized Bed Boiler

غلاية طبقة التميؤ الدوارة هى تجهيزه لتوليد البخار يحرق الوقود الحفرى فى فرن يعمل تحت ظروف هيدروديناميكية خاصة، حيث الجسيمات الدقيقة الصلبة تنقل خلال الفرن بسرعة تزيد عن سرعة السقوط الحر للجسيمات المنفردة. الجزء الكبير من المواد الصلبة المنقولة خارج الوعاء، يتم إقتناصه بواسطة جهاز فصل (Separator) ويتم إعادة تدويره ثانياً إلى نقطة قريبة من قاعدة الفرن بمعدل عالى كافى لإحداث كمية كافية من الإنعكاس (Refluxing) للمواد الصلبة فى الفرن.

الهواء الأولى (بكمية دون المكافئة) يتم حقنه خلال قاعدة الفرن وباقي هواء الإحتراق الثنائى يتم حقنه من الأجناب عند إرتفاع معين فوق القاعدة. حبيبات الفحم تحترق فى الفرن مولدة الحرارة. جزء من الحرارة يتم إستخلاصه بواسطة أسطح الماء / البخار الموجودة فى الفرن ولكن فوق مستوى حقن الهواء الثنائى.

إيجاد حالة هيدروديناميكية خاصة لتدوير طبقة التميؤ، المعروفة (Fast Bed). يعتبر مفتاح هذه العملية هو إنعكاس المجال المخفف (Dilute Phase Refluxing). الرباط المعين لسرعة الغاز، معدل التدوير، خواص المادة الصلبة، وحجمها والشكل الهندسى للنظام ، كل هذا ينتج عنه حالة هيدروديناميكية خاصة حيث الجسيمات الصلبة تكون معرضة إلى السرعة فى الإتجاه العلوى تزيد عن السرعة الأخيرة لمعظم الجسيمات المنفردة. لذلك فإن تلك الجسيمات لا يتم جرها فى الحال كما يلاحظ فى نظم النقل الهوائية العمودية. علي العكس ، المواد الصلبة توجد فى حركة إلى أعلا وإلى أسفل في مجموعات تعرف بالعناقيد (Clusters). تلك التجمعات الصلبة النحيلة ترى فى حركة عمودية، وجانبية، وسفلية. وهى مستمرة التكوين، وتذاب ويعاد تشكيلها ثانياً.

مقطع الغلاية تعمل بطبقة التميؤ موضح فى الشكل رقم (56)



شكل (56): فرن غلايه طبقة التميؤ الدوارة

فرن الغلايه يحتوى كتلة من المادة الصلبة الحبيبية (من 100–300 ميكرون)المعروفة كمادة الطبقة والتى تكون:

- الرمل أو الزلط (فى حالة الوقود مثل قطع الخسب، الفحم ذو المحتوى المتخفض من الرماد .. إلخ).
- الحجر الجيرى الطازج أو العادم (فى حالة الفحم ذو المحتوى العالى من الكبريت).
- الرماد من الفحم (فى حالة الفحم ذو المحتوى العالى أو المتوسط من الرماد الذى يتطلب عدم إحتجاز الكبريت.

أحياناً ، يستخدم مجموع من اثنين أو ثلاث من المواد السابقة. حبيبات الوقود تكون جزء صغير (أقل من 1٪) من إجمالى الطبقة من المواد الصلبة.

الغلاية يمكن تقسيمها إلى جزئين. المسار الأول: هو دورة تدوير المواد الصلبة، حيث الوقود يتم حرقه من الحرارة التى تم توليدها يتم إمتصاصه. دورة التدوير للمادة الصلبة تشمل:

- عازل الغاز–الصلب (بالسيلكون أو التصادم).
- تجهيز تدوير المادة الصلبة (مانع التسرب لحلقة التدوير –محبس).
- مبادل حرارى خارجى (إختيارى).

بالإضافة إلى الموضوعات السابق ذكرها مكونات أخرى متصلة بالغلاية هى طبقة الصرف (Bed Drain) وتصنيف المواد الصلبة (Solid Classifier).

حوائط المقطع السفلى للفرن تكون مبطنه إلى مستوى الهواء الثنائى بالحراريات. الفرن فوق هذا المنسوب يتم تبريده عموماً بواسطة أسطح مبخر (Evaporative)، أو التسخين الفائق أو إعادة التسخين. جهاز فصل الغاز – الصلب والمحابس الغير ميكانيكية لتدوير المادة الصلبة تكون كذلك مبطنه بالحراريات. هذه تمتص كمية محدودة من الحرارة. ولكن إذا كانت هناك حاجة لإستخلاص الحرارة بالإضافة إلى تلك التى تم إستخلاصها فى الفرن فإنه يكون من المهم تحويل جزء من تدوير المادة الصلبة الساخنة بين السيلكون والفرن خلال مبادل حرارى خارجى. هذا المبادل الحرارى هو طبقة تميؤ بالفقاعات (Bubbling) ذات أسطح تبادل حرارى مغمورة. يحدث القليل جداً من الإحتراق داخل المبادل الحرارى الخارجى، ولكن يمتص الكمية الضرورية من حرارة الإحتراق.

عموماً يتم حقن الفحم فى الجزء السفلى للفرن. أحياناً يتم حقنه فى عازل الإلتفاف (Loop

seal) حيث منه يدخل الفرن مع الأجسام الصلبة الساخنه العائدة. يتم التغذية بالحجر الجيرى فى الطبقة بنفس الطريقة.

بخلاف الهواء الأولى للإحتراق الذى يدخل الفرن خلال المصبعة الحديدية (Grate) لتوزيع الهواء، فإن الهواء الثنائى يتم حقنه عند إرتفاع معين فوق المصبعه الحديدية لإكمال الإحتراق. الفحم يحترق عند إختلاطه مع المواد الصلبة الساخنة للطبقة. المواد الصلبة للطبقة يتم خلطها جيداً خلال إرتفاع الفرن. لذلك فإن درجة حرارة الطبقة تكون متجانسة تقريباً فى المجال من 800–900°م رغم إستخلاص الحرارة على طول إرتفاعها. حبيبات الفحم الخشنة أو حبيبات القار يتم إحتجازها فى جهاز عزل الغاز– المادة الصلبة. الرماد ومادة الإمتصاص التالفه (Spent Sorbent) المولدة خلال الإحتراق وإزالة الكبريت تترك الفرن جزيئاً خلال طبقة الصرف وجزئياً خلال أجهزة فصل الغاز – المادة الصلبة .

الآتى هى المميزات الرئيسية لغلايات تدوير طبقة التميؤ:

Circulating Fluidized Bed Boilers

- مرونة الوقود: غلاية تدوير طبقة التميؤ يمكنها حرق مجال كبير من الوقود بكفاءة جيدة بدون تغير كبير فى مكونات الأفران.
- كفاءة إحتراق عالية: يمكنها حرق حبيبات الوقود ذات مجال كبير لحجم الحبيبات بكفاءة عالية جداً.
- الحجم الأصغر: لنفس الإنتاج فإن غلايه تدوير طبقة التميؤ تحتاج مساحة سطحية أصغر بمقارنتها بوحدات غلاية الفقاقيع (Bubbling Bed Boiler).
- إنخفاض تلوث الهواء: إنبعاث NOX من تدوير طبقة التميؤ يكون دون الحدود المقبولة. يمكنه خفض إنبعاث SOx بنسبة 90 ٪ مع أدنى استخدام للحجر الجيرى.
- القدرة الجيدة على الرجوع : Good Turn Down Capability غلاية طبقة التميؤ الدوارة يمكنها الإستجابة مع متطلبات الحمل المتغير بكل سهولة.
- نقط تغذية أصغر: تتطلب جزء فقط من نقط تغذية الفحم مقارنة بما تتطلبه غلاية الطبقة بالفقاعات (Bubbling) ذات نفس الحجم .

7

الفصل السابع

نظام الإحتراق وإحكامه

Combustion Systems And It's Control

الإحتراق هو تفاعل كيميائى سريع بين الوقود الأكسجين مع إنطلاقه حرارة. عادة الأكسجين يأتي من الهواء والنيتروجين الموجود فى الهواء لا يساهم فى التفاعل الكيميائي. الإحتراق المتقن يتم تحقيقه بخلط وحرق النسب الصحيحة تماماً للوقود والأكسجين. معظم أنواع الوقود تحتوى على الكربون، الهيدروجين والكبريت أحياناً. فى حالة إمداد هواء زائد فإن الخليط يسمى الهزيل (Lean) واللهب يسمى المؤكسد. وهذا ينتج عنه لهب الذى يميل إلى أن يكون أقصر وأكثر صفاءاً. الأكسجين الزائد يقوم بأى جزء فى العملية.

فى حالة الإمداد بوقود كثيرا جداً (أو أكسجين غير كافى) عندئذ يكون الخليط غنى (Rich) واللهب يكون مختزلاً (Reducing). يسمى هذا كذلك الإحتراق الغير كامل، حيث كل جسيمات الوقود تتحد مع الأكسجين ولكنها لا تحصل على الأكسجين الكافى للإحتراق التام.

فى حالة الوقود الغازى والوقود السائل، فإن كلا من الهيدروجين والكربون لا يظهر كعناصر نقيه. بدلاً من ذلك فإنهما يتحدا إلى مركبات كيميائية التى يسمى الهيدروكربونات (Hydro Carbons). فى عملية الإحتراق، حرارة الإحتراق تكسر تلك الهيدروكربونات حيث تبدأ فى التفاعل مع الأكسجين مكونه مجموعة جديدة من المكونات ، والتى تنكسر بالتالى وتتفاعل مع باقى الأكسجين، مكونه ثانى أكسيد الكربون، بخار الماء.. إلخ. ذلك مع إنطلاق حرارة مفيدة. كل هذا يحدث بسرعة حيث نقول أن الهيدروكربون يتفاعل مباشرة مع الأكسجين لتكوين ثانى أكسيد الكربون وبخار الماء.

أى نظام إحتراق له المكونات الأساسية الآتية:

- مصدر الهواء.
- مصدر للوقود.
- موقد.
- تنسيب الهواء– الوقود والتحكم فى التدفق.

الظواهر الآتية لنظام الإحتراق يتم مناقشتها.

- الخواص الأساسية للمواقد.
- هندسة اللهب وتكنولوجيا الإنتقال الحرارى.
- نسبة الوقود — الهواء والتحكم.
- إحكام ضغط الفرن.

الخواص الأساسية للمواقد:

المهام الأساسية للموقد هى تنظيم اللهب وإستمرار المحافظة على الإحتراق. الخواص الأساسية للموقد هى شكل اللهب، حجم الإحتراق، الثبات، التشغيل، التوقف.

شكل اللهب : Flame Shape

تصميم الموقد الذى يحدد السرعات النسبية لتدفقات الوقود والهواء، له أقصى تأثير على طول اللهب وشكله. الخلط الجيد، نتيجة درجة الإضطراب العاليه والسرعات العالية، ينتج لهب قصير وكثيف. على الجانب الآخر الخلط المعوق والسرعات البطيئة تنتج لهب طويل وكسول. الإضطراب والخلط الجيد يتم تعزيزهم باستخدام ريش (Vanes) فى مسار التدفق لإحداث الدوامة. الضغط العالى قد يعمل على دفع الوقود بعيداً عن فوهه الموقد قبل تسخينه إلى درجة حرارة الإشتعال وبذا تحدث إستطالة للهب.

بالنسبة لموقد معين، فإن متغيرات التشغيل مثل التغيرات فى ضغط خليط الوقود — الهواء أو كمية الهواء الأولى سوف يؤثر على شكل اللهب. عموماً الزيادة فى ضغط الخليط سوف تعمل على توسيع اللهب، والزيادة فى الهواء الأولى سوف تقصر اللهب (معدل المدخلات يظل نفسه). ولكم تأثير تلك التغيرات على شكل اللهب ليس كبيراً.

حجم الإحتراق : Combustion Volume

الفضاء الذى يشغله الوقود والمنتجات الوسيطة الناتجة عن الإحتراق فى خلال عملية الإحتراق (اللهب والإحتراق الغير مرئى) يتغير كثيراً طبقاً لتصميم الموقد، وضغوط وسرعات لتدفقات المائع، الوقود والإستخدام. مواقد الغاز ذات السطح الحرارى والتى تعمل عند ضغط خلط مرتفع جداً والخليط الجيد يمكن أن يطلق ما يزيد عن 350 مليون كيلو كالورى / الساعة / المتر المكعب لحجم الإحتراق. حجم الإحتراق لأنواع أخرى من مواقد الغاز يتراوح ما بين الرقم السابق ذكره إلى مليون واحد كيلو كالورى/الساعة/المتر المكعب. ومواقد الزيت الخفيف تعمل عند معدل مليون كيلو كالورى/الساعة ×متر مكعب، ومواقد الزيت الثقيل عند 700000 كيلو كالورى / الساعة / مترمكعب. فى بعض الحالات التطبيق نفسه يمكن أن يحد من معدل إطلاق الحرارة. الإستخدامات التى تحتاج إلى لهب طويل ومضئ ، قد تحد من إنطلاق الحرارة إلى 350000 كيلو كالورى/ الساعة × المتر مكعب. فى الغلايات (حيث الإستخدام المستمر نادراً ما يسمح

بالتوقف لإستبدال الحراريات وأنابيب الغلايه) تصميم معدل إنطلاق الحرارة يكون عادة محدوداً من 180000 إلى 350000 كيلو كالورى / الساعة × متر مكعب.

الثبات : (Stability)

ثبات الموقد يمكنه من إستمرار الإشتعال عند البرودة طوال مجال الضغوط، معدلات الطاقة ونسبة الوقود–الهواء. فى الأجواء المحيطة الباردة، بعض المواقد تعمل فقط عند الحرق الغنى (Rich) وفى وجود الهواء الحر. مع مثال تلك المواقد يكون من المهم المحافظة على إستمرار فتح أبواب الفرن من الإضاءة حتى حدوث إستقرار لدرجة الحرارة فى غرفة الإحتراق. على الجانب الآخر توجد بعض المواقد التى تكون ثابته حتى فى الأفران الباردة المحكمة الإغلاق. مواقد الثبات ذات التكسير بالآجر/القرميد (Tile Stable Burners) تم تطويرها حيث يمكنها إستمرار الإشتعال فى الغرف الباردة بمساعدة التكسية بالأجر فقط. المشكلة الكبيرة لثبات اللهب هى فى الغرف الباردة والمضغوطة. فى مثل هذه الإستخدامات نواتج الإحتراق الباردة يعاد يدويرها إلى تكسيه الآجر للموقد ويطوق مصدر اللهب بجو بارد ذو الأكسجين المنخفض. تلك المشكلة يمكن التغلب عليها بإعادة تصميم المواقد للتخلص من ذلك التدوير المحيطي بالإمتلاء الكامل للكتلة بالهواء والوقود. تلك المواقد ليست مستقرة فقط بالآجر فى عرف الإحتراق البارد، ولكنها جوية فى الأفران محكمه الغلق.

ثبات إستقرار اللهب يمكن تعزيزه بأجسام مرتفعة وشديدة الإنحدار (Bluff Bodies) (اوح تشتت أو عارضه أفقية) أنبوب بثق دوامة ... إلخ.

التشغي متعلق بسرعة وضغط نافورة التدفق للغازات الساخنة التى تدفع نحو الفرن. عندما يكون الوقودُ رخيصاً (ردئ النوع – Cheap) يتم إستخدام الهواء الزائد للمساعدة فى تجانس درجة الحرارة بخفض درجة حرارة المخلوط الساخن، منع العزل وتعزيز الإنتقال الحرارى بالحمل الحرارى. مع المواقد ذات السرعة العالية التي تستحث إعادة تدوير غازات الفرن، فإن غازات التدوير تنتج الفوائد الثلاثة السابقة وبذا عدم استخدام الهواء الزائد وبالتالى عدم الفقد فى الوقود. مواقد السرعة العالية يمكنها دفع غازات الساخنة إلى كومة الحمل المفككة بسرعة أكبر عن ما هو ممكن مع معظم مواقد الهواء الزائد القديمة، لذلك فإن الحمل الحرارى عنوه (Forced Convection) يتم تحسينه نحو داخل الحمل.

ميزه أخرى لتلك المواقد عاليه السرعة هى قدرتها على الوصول والإلتفاف حول أجزاء من الحمل الموجودة على مسافة من المواقد.

نسبة معدل مدخلات الطاقة : (Turn Down Ratio)

نسبة معدل مدخلات الطاقة هى النسبة ما بين أقصى وأدنى معدلات المدخل الحرارى الذى به سوف يعمل الموقد بكفاءة. أقصى معدل مدخل حرارى يكون محدوداً بتصريف اللهب (Flame Blow Off). هذا ينتج عندما تزيد سرعة الخليط عن سرعة اللهب. أدنى معدل لدخل الطاقة يكون محدوداً بظاهرة تعرف بـ إرتداد اللهب (Flash Back) التى تكون نتيجة زيادة سرعة اللهب عن سرعة الخليط. النسبة العالية لمعدل مدخلات الطاقة تكون مطلوبة عملياً فى الأفران ذات الدفعة الواحدة (Batch Type) حيث تكون الحاجة إلى إرتفاع معدل مدخلات الطاقة خلال التسخين الأولى للفرن أو بعد الشحن مباشرة، ولكن حيث هذا المعدل العالى الأولى لا يمكن استخدامه خلال دورة التسخين كلها. فإنه يلزم فى حالة الأفران المستمرة إنخفاض نسبة معدل مدخلات الطاقة بدرجة كبيرة.

هندسة اللهب وتقنيات الإنتقال الحرارى:

ضرورة الوفرة فى الوقود عند عمل التسخين السريع المتجانس نتج عنها دراسة عميقة لهندسة اللهب وتقنيات الإنتقال الحرارى. المواقد ذات الإستخدامات الخاصة وذات شكل لهب خاص تم تطويرها لمساعدة الإنتقال الحرارى بالإشعاع والحمل الحرارى. فى معظم الأفران الصناعية تقنيات الإنتقال الحرارى المستخدمة هى أساساً بالإشعاع وبالحمل الحرارى. التوصيل الحرارى عادة يكون عملية ثانوية بعد خطوة الإشعاع أو الحمل الحرارى. شكل اللهب يكون ذو أهمية عاليه فى الإنتقال الحرارى من عمليات الإحتراق. تقنية الإنتقال الحرارى من عملية الإحتراق إلى الحمل تتعلق بإطار إنطلاق الحرارة الذى يتأثر بإضاءة ولمعان اللهب وسرعة وكذلك شكل اللهب.

إطار الإنطلاق الحرارى هذا هو مسألة شكل أو هندسة.

التسخين بالإشعاع : (Radiation Heating)

التسخين بالإشعاع يتم إستخدامه عند تسخين سطح مستوى أو رقيق للمادة أو عندما تكون المادة موصل جيد أو عند سهولة إحاطتها بأسطح مشعه متوازيه. التسخين بالإشعاع يميل إلى أن يكون ذاتى الإنتشار لذلك التوفير الطبيعي للتوزيع المتجانس للحرارة فوق السطح.

لتنفيذ نفس التجانس بالتسخين بالحمل الحرارى (Convection) يتطلب صف من

النافورات عاليه السرعة بينما موقد الإشعاع من نوع الإنتشار الواحد يمكنه عمل مهمة التسخين المكافئة مع القليل جداً من المعدة. رغم أن معظم التسخين الإشعاعي ووظيفة نافورة التسخين بالتصادم تتطلب التطويق لمصادر الحرارة، فإن نوع الإشعاع يكون إلى حد ما أكثر إعتماداً عليه في العديد من الإحمال التي يمكن أن يتم تسخينها جيداً.

نوع لهب الإشعاع المنتشر يفضل كثيراً عند تسخين وعاء محتوياً حمل ثمين أو أن الوعاء نفسه ثمين والذى عند تصادم اللهب عليه سوف يسبب ثقوب محليه على تلك الأوعية والتي تحدث بها تلفيات. الإحتجاز الحرارى (Holding Heat) للسائل في الأوعية المعزولة أحسن إستخدام له بالإشعاع. السبب في ذلك هو أن الفقد الرئيسي في الحرارة يكون من سطح السائل ومهمة التسخين هى تعويض أي فقد من السطح. من وجهه نظر الإنتقال الحرارى، يكون السطح عندئذ مثل سطح رقيق مستوى من المواد الصلبة.

مواقد اللهب المستوى: (Flat Flame Burner)

المواقد لإشعال أنابيب الغمر وأنابيب الإشعاع لها بعض المتطلبات الخاصة. في كلا الحالتين تم إستخدام فنيه إحتباس اللهب ذات فتحة محيطية حولها للهواء الثنائي. ولكن هذا يعطي معدل محدود جداً للطاقة في حالة موقد أنبوب الإشعاع، يمكن أن يعطى درجة حرارة غير كافية على طول إستطالة الأنبوب. مواقد الأنبوب المغمور الحديثة توفر سرعة عاليه للحك على السطح الداخلي للأنبوبة. مواقد الانبوب المشع تجمع الخلط المسبق جزيئاً مع الخلط المؤجل بهدف الحصول على إطار لمستوى إطلاق الحرارة على طول أنابيب الإشعاع.

التسخين بالحمل الحرارى : (Convection Heating)

التسخين بالحمل الحرارى بالمواقد الحديثة ذات اللهب الأمامي عالى السرعة أفضل إستخدام لها في التطبيقات المتضمنة التسخين للشحنات ذات الأكوام المفككة، التسخين بالتصادم، إنتقال الكتلة والتسخين بالحرق المباشر للغاز. الحمل الحرارى له مميزات الإحتراق المباشر إلى الفجوات العميقة والضيقة. تدفقات الحمل الحرارى يمكن نثرها داخل الإحاطة أو المسورة(Enclosures)، حيث الإشعاع يمكنه فقط السير في ضغوط مستقيمة.

الحمل الحرارى يمكنه العمل كعامل إنتقال كتله، حيث يوفر المجال لحمل الأبخرة بعيداً، الأكاسيد أو الغازات الأخرى الناتجة عن عملية التسخين، إذا كانت تلك الأبخرة أو القابلة للتفاعل (Reactants) لم يتم حملها (Mass Action).

التسخين بالحمل الحرارى يمكن إيقافه فوراً إذا كان هناك توقف فى مكان آخر ما فى إستمرار العمل. التسخين بالإشعاع بالمقارنة يمكن أن يحقق تراكم لتخزين الطاقة فى المصدر المشع. وهذه الحرارة يمكن أن تستمر لتصب فى الحمل حتى بعد توقف اللهب.

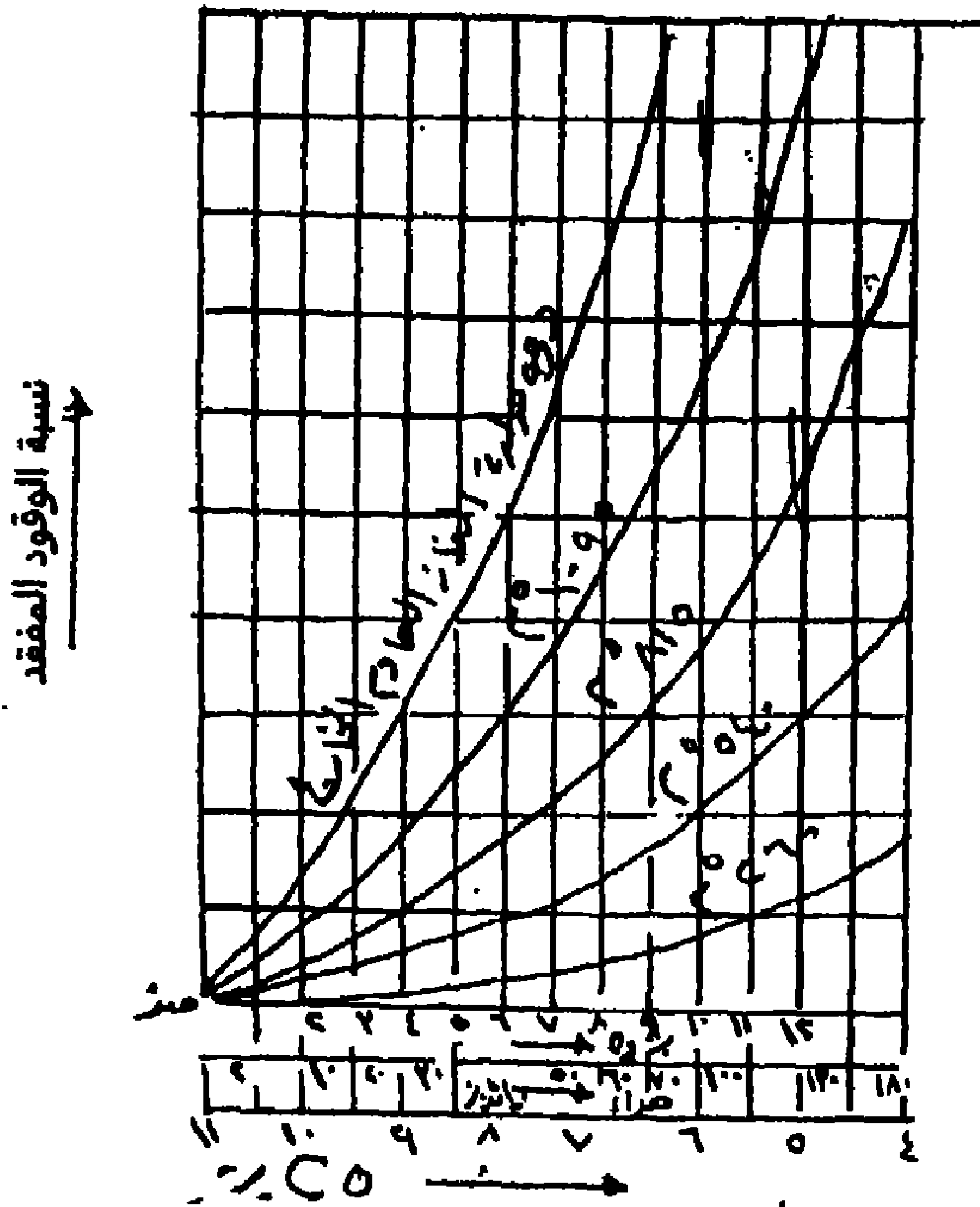
إذا كان الحمل الكلى له مقطع سميك ولكنه مفتوح ليسمح بالتدوير خلال أجزائه، كما فى حالة الطوب فى الفرن النفقى (Tunnel Kiln) صناديق الصلصال للسيراميك (Ceramic Sag gars)، أكوام المسبوكات الغير منتظمة أو سلات السلك، فإن اللهب الأمامى عالى السرعة عادة يمكن توجيهه خلال الأنفاق ذات السقف المفتوح أو أى تنظيم آخر للإحتراق خلال القطع الكثير للحمل السميك.

مهمة التسخين الأكثر صعوبة هو عندما يكون الحمل له مقطع سميك ويكون صلباً. بحيث أن الغازات الساخنه لا يمكنها التدوير خلاله. لا الإشعاع ولا الحمل الحرارى يمكنه أن يبعث الحرارة إلى داخل الكتلة فقط إلى السطح– فى مثل هذه الحالات، يمكن الإعتماد على التوصيل الحرارى (Conduction)، لتسريب ونشر الحرارة إلى مركز الحمل هذه العملية تسمى نقع (Soaking) أو التسريب أو الإنضاج الحرارى .

نسبة الوقود – الهواء وإحكامها : Fuel – Air Ratio And It's Control

التحليل للمنتجات للغاز العادم يعطى بيان محدد لإكمال تفاعلات الإحتراق والإستخدام للوقود. الأكسجين الحر فى العادم يبين إرتفاع نسبة الهواء الزائد. عندما يكون المطلوب الإحتراق المكافئ، فإن زيادة الأكسجين فى العادم سوف يعنى الفقد فى الوقود بسبب وجود النيتروجين بكمية كبيرة لزيادة نسبة الهواء والذى يحمل جزء كبير من الحرارة. وجود مواد قابلة للإحتراق مثل الكربون أو أول أكسيد الكربون سوف يعنى الإحتراق الغير كامل. فى الإحتراق الغير كامل فقد جزء جيد من الوقود. لذلك فإنه يتضح أن كلا من الهواء الزائد والهواء الغير كافى سوف يسبب إستهلاك عالى للوقود والذى يمكنه خفضه فقط بضبط الهواء الزائد والوقود الزائد.

الشكل (57) يوضح الوفر التقريبي فى الوقود المتاح بالتحول من الإشعاع بالهواء الزائد إلى الإشعال بالمكافئ من الغاز الطبيعي، والذى يبين بوضوح الوفر الكبير فى الوقود الذى يمكن تحقيقه بالمحافظة على النسبة الصحيحة للهواء– الوقود.



شكل (57): وفر الوقود يتغير من الهواء الزائد
إلى الإحتراق المكافئ للغاز الطبيعي

صفر أكسجين أو ثانى أكسيد الكربون نادراً ما يحدث بسبب عدم إتقان الخلط وتسرب الهواء. بعد الضبط لأفضل نسبة للوقود – الهواء فإن إستخدام فتحات القياس سوف تسهل المراجعة لمعرفة أنه تم تكرار أفضل حالة. يوجد بعض مواقد الغاز التى مازالت تستخدم والتى لا تعطى الإحتراق الكامل حتى عند مستوى هواء زائد 20٪، حيث يفضل إستبدال تلك المواقد بنوع المواقد الأكثر كفاءة.

بعض الإستخدامات تحتاج إلى عملية الهواء الزائد، وهذه تتطلب التحليل لمعرفة مستوى الهواء الزائد المستخدم ، إذا كان مطلوب حقيقة أم لا– فى هذه الإستخدامات. يستخم الهواء الزائد أساساً لإحداث تجانس فى درجة الحرارة . الهواء الزائد يمكن خفضه فى هذه الإستخدامات وذلك من خلال إستخدام المواقد ذات السرعة العالية وبإستخدام عدد أكبر من المواقد الصغيرة. الموقد عالى السرعة سوف يحقق نفس الدرجة من تجانس درجة الحرارة بإستخدام هواء أقل (كثيراً)مقارنة بالموقد منخفض السرعة.

النسبة الصحيحة للوقود – الهواء يمكن إحكامها أساساً بثلاث طرق وهى:

- المحافظة على المساحات النسبية فى محابس الوقود–الهواء.
- المحافظة على إستمرار الضغط النسبي فوق التيار لمحابس الوقود والهواء أو الفتحات (Orifices).
- المحافظة على إستمرار معدلات التدفق النسبية عبر فتحات الهواء –الوقود.

إحكام المساحة : (Area Control)

إحكام المساحة النسبة الوقود–الهواء (كذلك تسمى إحكام محابس نسبة الوقود–الهواء) يمكن تحقيقه باستخدام الضغوط الثابته والمساحات المتغيرة. آلية بسيطة يمكن إستخدامها لإحداث التغير فى نسبة مساحات فتحة محابس الوقود–الهواء لواحد والآخر. هذا يتطلب أن كلا المحبسين لهما خواص متشابهه وأن الوصلة الميكانيكية بينهما تنتج تحرك نسبي مباشرة.

نظام إحكام المحبس يتطلب نافخ الهواء (Air Blower) بخواص الضغط الثابت، وأجهزة تنظيم الضغط لثبات ضغط الغاز والزيت على رأس محبس الإحكام، ذلك لأن الضغوط فوق التيار لكل من الهواء والوقود يجب أن تكون ثابته. فى حالة زيت الوقود، درجة حرارة الزيت يجب أن تكون ثابتة عند المحبس ذلك لأن المتغيرات فى لزوجة الزيت سوف تؤثر على معدل التدفق.

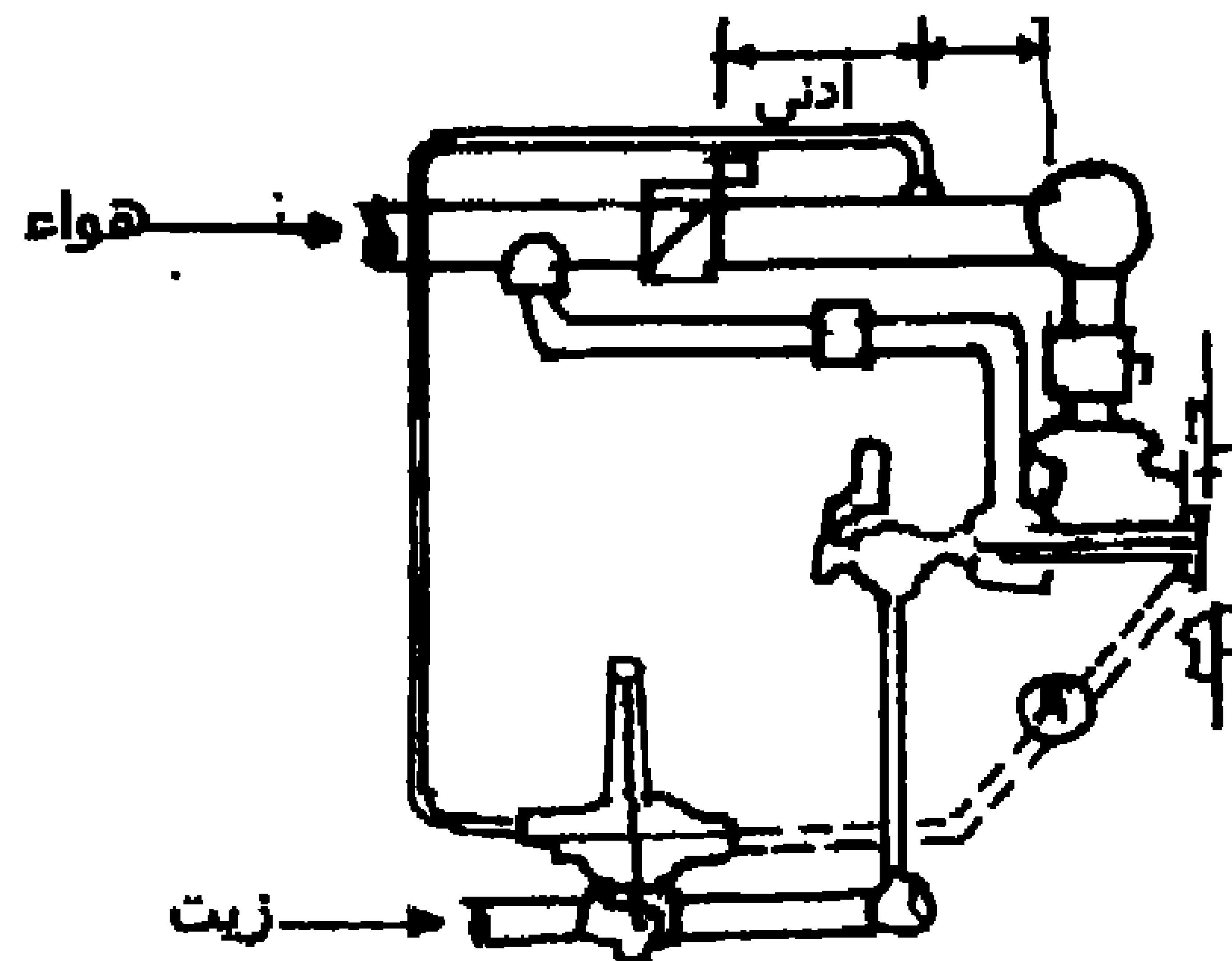
حتى رغم أن زوج من محابس التنسيب قد يكون لهم نفس خواص المساحة، فإنه من غير المحتمل أن يكون لهما نفس خواص التدفق بسبب الإختلافات فى الكثافة، اللزوجة والجذب السطحي للسوائل تجعلهم غير متشابهين من وجهة نظر الديناميكا الهوائية (Aerodynamically)، مسبباً نسبة الوقود والهواء إلى أن تضعف نحو الغنى (Rich) أو الضعف فى مختلف أجزاء مجال العمل.

إحكام الضغط: (Pressure Control)

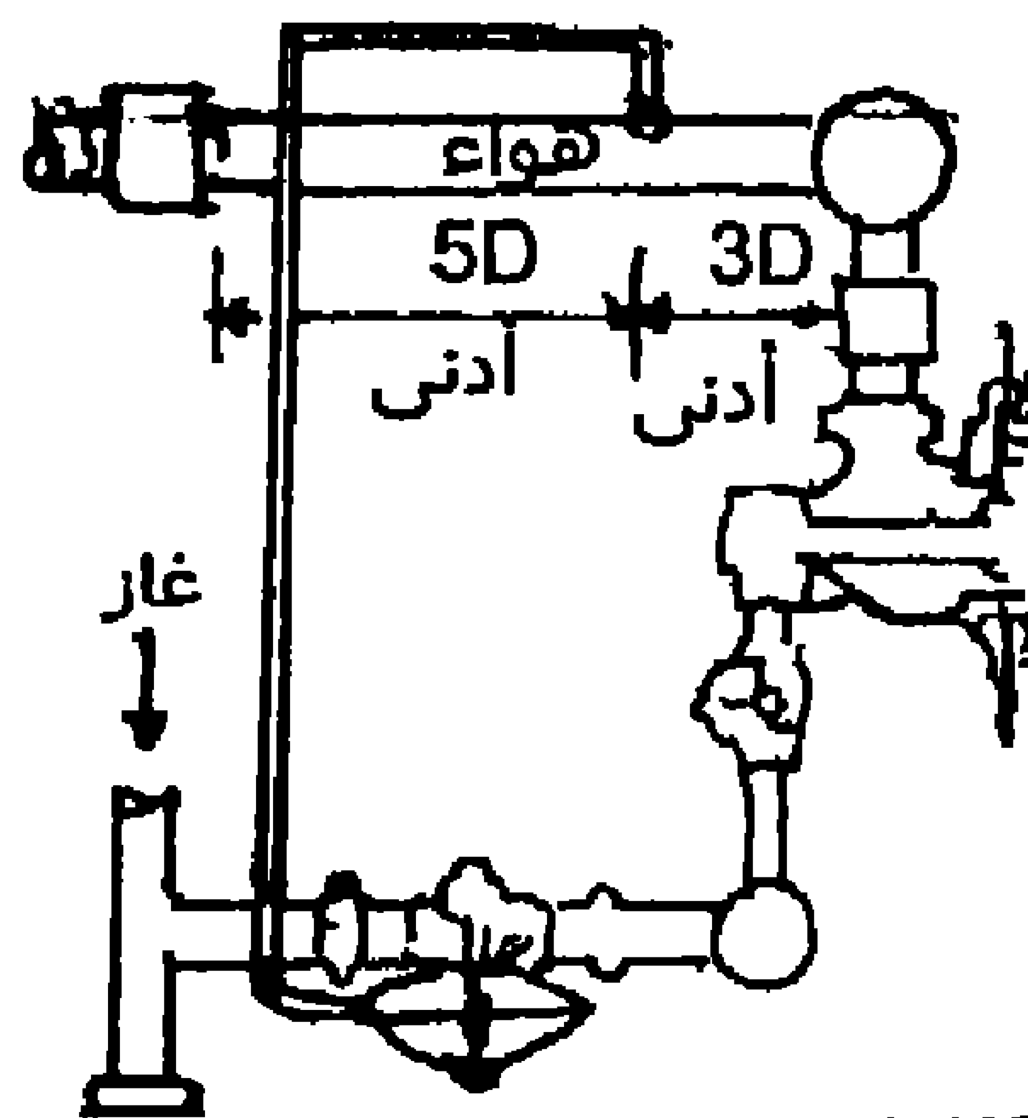
إحكام الضغط لنسبة الوقود – الهواء يعمل على فرضية أن مقارنة التدفق تحت التيار من محبس التحكم يكون ثابتاً فى كل من خطوط الوقود والهواء لأى نظام لموقد. التدفق خلال المقاومة الثابتة يتناسب مع الجذر التربيعي لفرق الضغط عبر المقاومة. لذلك، إذا كان ضغط الهواء الوقود يكونا متناسبين أو متساويين، عندئذ فإن معدلات تدفق الوقود والهواء تصبح متناسبة خلال كل مجال معدلات الإحتراق. بينما نظام إحكام المحبس السابق مناقشته يعمل على مبدأ الضغوط الثابتة والمساحات المتغيرة، هذا أكثر دقة وقابل للإستخداك فى نوعيات كبيرة من التنظيمات.

العمل العادى هو يوضح محبس إحكام مدخلات الطاقة الرئيسية فى خط الهواء وإستخدام منظم النسبة فى خط الوقود. فى التطبيقات حيث أقصى ضغط غاز متاح يكون أقل من ضغط هواء الإحتراق. يكون من الضرورى إنتاج خط ضغط نبضى (Impulse) أقل من ولكن يتناسب للضغط فى خط هواء الإحتراق. يتم تنفيذ ذلك باستخدام نازف (Bleeder) الذى يسمح بكم معين من التسرب من وصلة النبض، بذا خفض الضغط الذى يعمل على رق المنظم (Regulator Diaphragm).

عند حرق الزيت فى مواقد الضغط المنخفض للهواء وبالترزيز، يكون المطلوب أن ضغط الزيت أكبر عدة مرات من ضغط هواء الإحتراق، أفضل من أن يساويه. هذه النسبة يتم المحافظة على إستمرارها بمنظم نسبة الزيت – الهواء الذى فيه الرق العلوى له مساحة عدة أضعاف الرق السفلى. نظام إحكام نسبة الزيت/ الغاز – الهواء موضح فى الشكل (58)، (59).



شكل (58): أحكام نسبة الزيت / الهواء بالهواء البارد



شكل (59): إحكام نسبة الغاز/الهواء بالهواء البارد

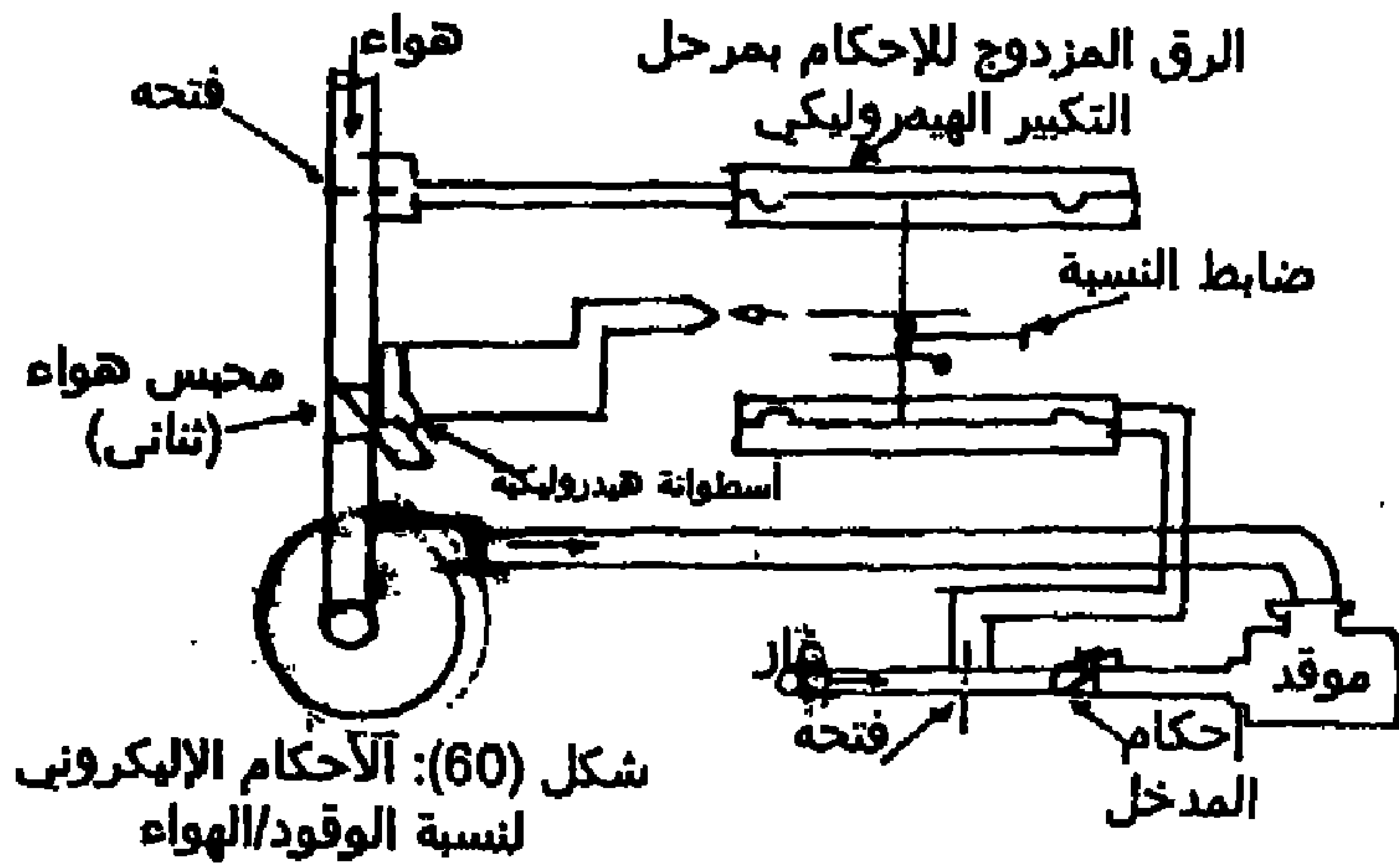
إحكام التدفق (Flow Control)

هذا النظام يقيس حقيقة تدفق الهواء وتدفق الغاز ويضبط تدفق واحد من تلك الموائع طبقاً لذلك. معدلات التدفق يتم قياسها بصنابير الضغط (Pressure Taps) التى تقيس فروق الضغط خلال فتحات فى خطوط الهواء والوقود. فروق الضغط هذه يتم نقلها إلى تجهيزه إحكام التى تقوم آلياً بضبط تدفق الهواء (أو الوقود) للمحافظة على النسبة المطلوبة. نموذج لهذا النظام له نبضاب ضغط فوق فوق التيار وتحت التيار من فتحة تشابهه فى خط الوقود التي تعمل على رق أخر بحيث أن تعكس أداء رق الهواء. التحرك الناتج للعامود يتم نقله وتكبيره بوسائل هيدوليكية، كهربية، هوائية.

هذا الخرج (Out Put) الذى تم تكبيره يحفز (يدين) محبس إحكام بالبثق (Throttling Control Value) فى خط الوقود او خط الهواء أيهما ليس هو المائع الأول. الحاكم (Controller) يجب أن يحتوى ضابط يدوى للنسبة لإختبار نسبة الوقود–الهواء المطلوبة.

البدائل الإلكترونية لإحكام تدفق نسبة الهواء يمكنها بسهولة تضمين الجذر التربيعي (Square Root Extractors) بحيث يمكن جمع أو طرح الإشارات (Signals). فى حالة الرغبة فى المحافظة على النسبة الصحيحة للوقود — الهواء عند حرق العديد من الوقود فى توقيت واحد أو عندما يكون الهواء اللازم إثراؤه بالأكسجين، من الضرورى إضافة أو طرح الجذر التربيعي لفروق الضغط التى تم قياسها.

أجهزة الإحكام الإليكترونية تشمل نسق عيارى (Module) أساسى لنسبة الوقود — الهواء، الذى يمكن أن يضاف إليه أنساق عيارية أخرى لاستخلاص الجذر التربيعي، تعويض درجة حرارة الهواء / الوقود، مختلف القيم الحرارية لأنواع الوقود. إشارة الخرج يمكنها تشغيل المحابس التى تعمل بالكهرباء، الهواء، الهيدروليكية. نظام الإحكام هذا موضح فى الشكل (60).



شكل (60): الإحكام الإلكرونى لنسبة الوقود/الهواء

ضغط الفرن وإحكامه : (Furnace Pressure And It's Control)

معظم المميزات الخاصة باستمرار النسبة الصحيحة للوقود–الهواء تفقد، إذا كان هناك تسرب كبير من دخول الهواء فى الفرن. دخول الهواء الخارجى ينتج عنه خطأ فى تحليل الغاز العادم. الهواء الدخيل يتسرب إلى الفرن خلال فتحات الفرن فى حالة عمل الفرن تحت الضغط السلبي. نسبة تسرب الهواء يمكن خفضها بتشغيل الفرن تحت ضغط موجب قليلاً وكذلك بغلق الفتحات.

الضغط السالب في الفرن بالإضافة إلى تضمينه الهواء البارد فإنه كذلك سوف يعمل على تبريد قاع الحمل مسبباً ضعف نوعية المنتج كما يؤثر بالسلب على جو الفرن. سيكون المطلوب وقود زائد يتم حرقه لتسخين الهواء البارد وذلك لإستعادة التجانس المطلوب ومعدل الإنتاج.

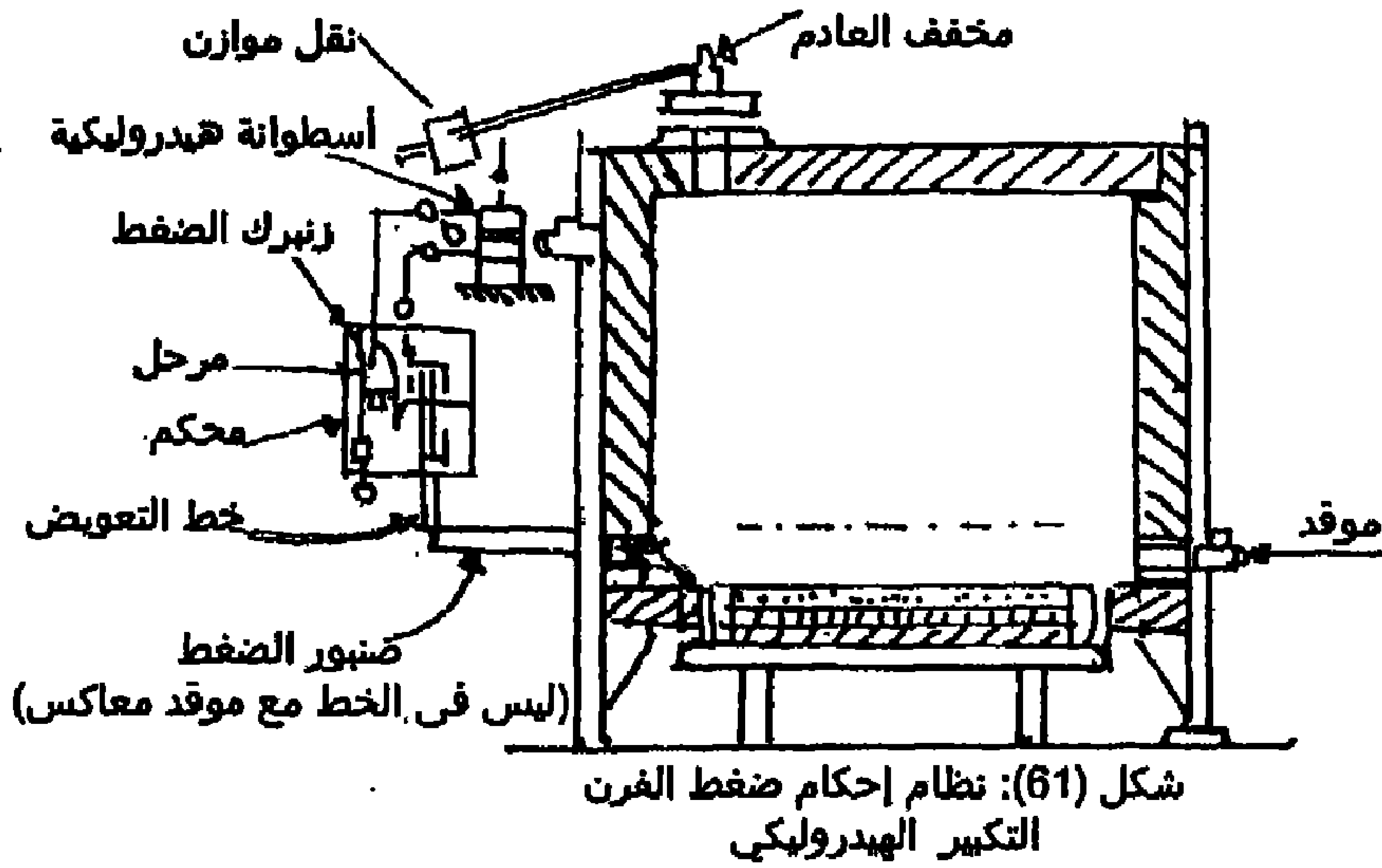
كذلك فإن الضغط الزائد العالى ليس مطلوباً. الضغط الزائد العالى سوف يسبب تسرب عند الابواب والشقوق للعادم، وسوف يدفع الرمل والماء من مانع التسرب وسوف يؤثر بالسلب على صيانة وتشغيل الفرن.

تلك المشاكل يتم معالجتها بنظام إحكام ضغط الفرن الآلى – ضغط الفرن يمكن إحكامه بضبط مخمل العادم (Flue Damper) الذى له تغيرات لا نهائية. فى حالة المضائل الثقيل يكون المطلوب نظام هيدروليكي .

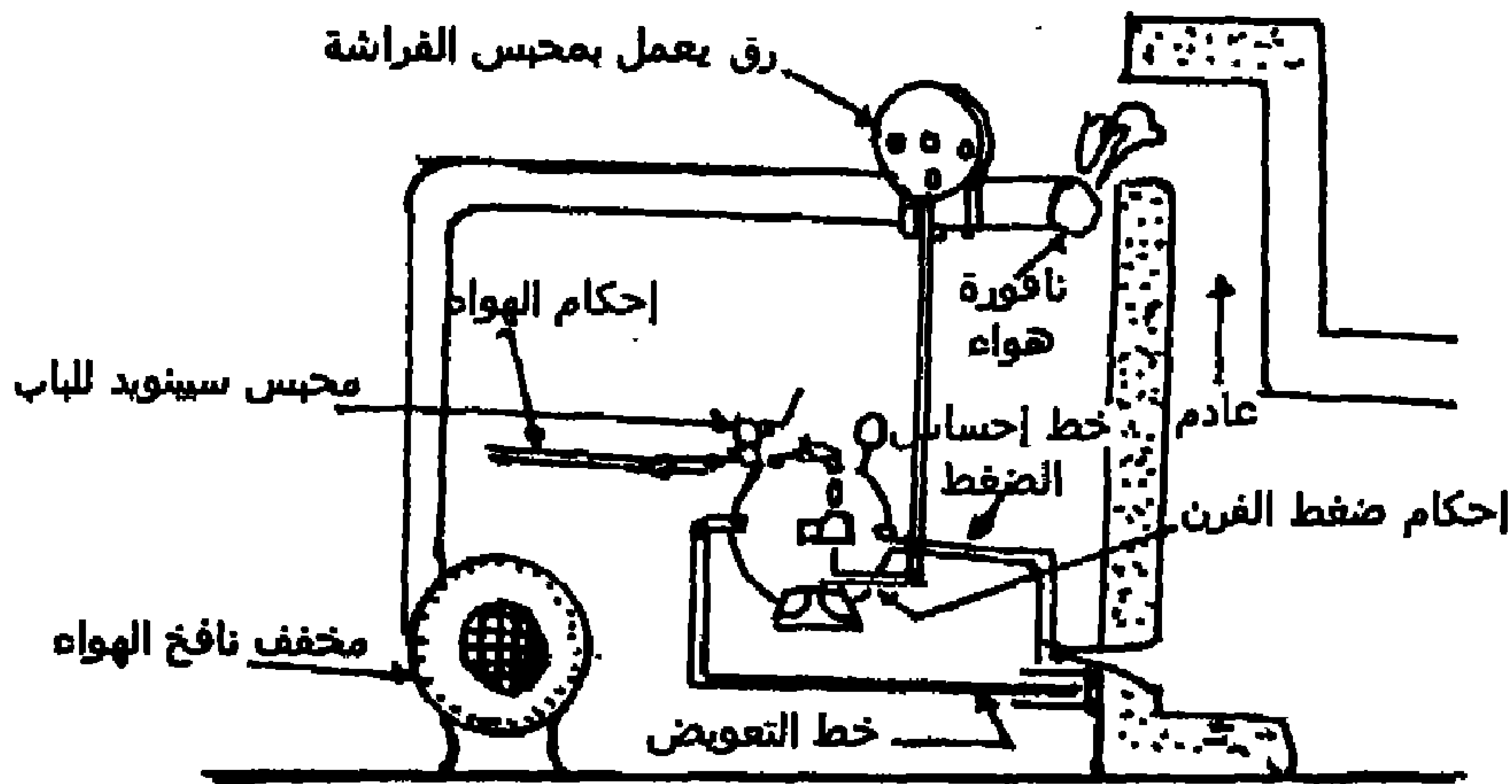
الشكل رقم (61) يبين نموذج لنظام آلى مستخدما مضخم ترحيل (Magnifying Relay) لتكبير التغير فى الضغط المكتشف بالرق الكبير. يمكن وضع زنبرك وضبطه يدوياً لأى ضغط مطلوب من 1.25 إلى 2.3 مليميتر عامود ماء. يمكن إستخدام خط التعويض فى نفس المستوى مثل صنبور الضغط ولكن خارج الفرن مباشرة حيث يعمل كقياسى للمقارنة.

مخملات نافورة الهواء (Air Jet Dampers) تغنى عن مشاكل الصيانة لآليات الحركة فى

تدفق الغاز العادم الساخن فى اتساع لا يزيد عن واحد متر. المشكلة فى الماضى بالنسبة لإحكام ضغط الفرن كانت الحاجة إلى رق الإحساس ذو القطر الكبير (40سم) الضرورى لإكتشاف التغيرات الصغيرة جداً فى الضغط. تلك بالتالى أو جدت ضرورة سدادة خطوط ضغط وتسببت فى تأخير كثير للوقت إذا كانت الخطوط طويلة. ولكن، تنظم الرق عالى الحساسية أقل من ربع الحجم السابق المزود بدوائر إليكترونية للكشف والتكبير تم منذ تطويرها التغلب على تلك المشاكل شكل (62) محور الطاقة (Transducer) يستشعر فروق الضغط وينتج علامة فولتيه التى تتناسب طولياً مع فرق ضغط مدخل الطاقة إشارة الفولت عندئذ يتم تكبيرها إليكترونياً وتغذيتها إلى مكتشف متغير المنسوب حيث تتم مقارنة الإشارة مقابل المستوى الحالى المستخدم كنقطة إحكام لوضع الضغط المطلوب.



شكل (61): نظام إحكام ضغط الفرن
التكبير الهيدروليكي



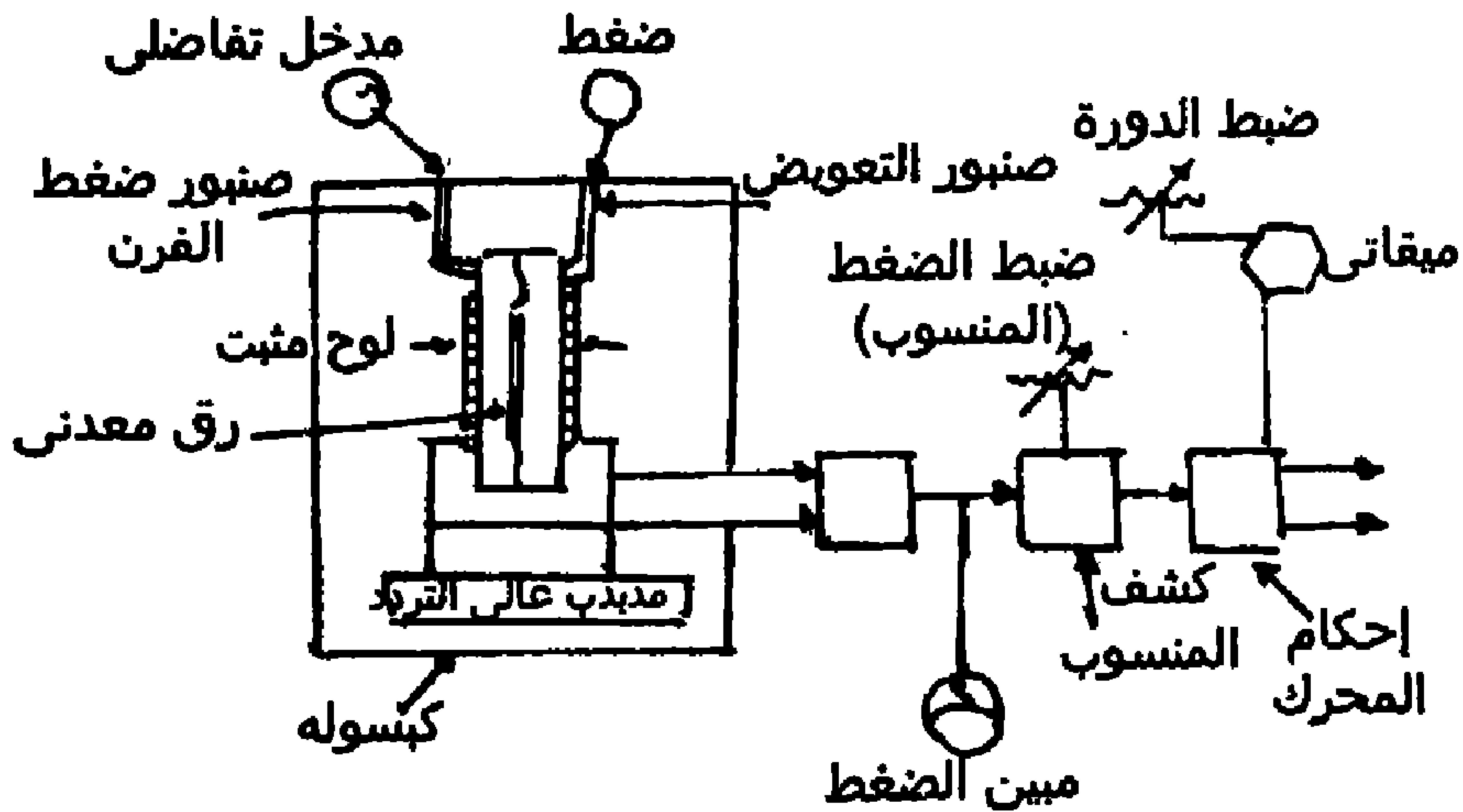
شكل (62): نظام إحكام ضغط الفرن
بالتطوير الهواء-بمخفف نافورة الهواء

خرج لمكتشف المنسوب أما أن يكون:

- أكبر من المستوى الحالى (دخل الضغط أعلا من المطلوب).
- أقل من المستوى الحالى (دخل الضغط أقل من المطلوب).
- فى نفس مستوى الضغط الحالى (يكون الضغط عند نقطة الإحكام المطلوبة).

تتم التغذية إلى زوج من 110 فولت تيار متغير من مرحلات الحالة الصلبة (A pair Of 110 Volts A-C Solid state Relays) التى تسلك مثل عنصر إحكام المحرك متعدد الإتجاهات (أو يمكن أستخدامهم لأداء تلك البنود لمحفزات خارجية للمحرك (Starters)، محابس أو محابس هيدروكهربية (Electron hydraulic).

فى بعض تطبيقات إحكام الضغط، نظام الضغط تغيرات الضغط تبدى إستجابة مؤجله إلى التغير فى الإحكام. للتطابق مع هذا النظام لإعاقة الوقت وتحقيق إحكام مستقر، فإن وحدة الإحكام (Controller) الإليكترونية بالضغط تكون مزودة بدورة ميقاتية ذات أداء متغير (Variable duty Cycle timer) لإمكان إحكام المحرك. القدرة يمكن أن تتم بإستمرار أو عند فترات تتراوح من حوالى ثلاث ثوان كل دقيقة. ضبط عنصر ضبط مهمة الدورة وضبط منسوب الضغط هما عنصرى الضبط الذى يستخدمهم المستخدم على وحدة إحكام الضغط الإليكترونية. هذا النظام موضح فى الشكل رقم (63).



شكل (63): نظام إليكترونى لإحكام الضغط

المحتويات

- مقدمة 5

الفصل الاول :

- المبادئ العامة للإحتراق وأنواع الاحتراق.................................7

الفصل الثانى :

- إحتراق الوقود الصلب / نظم إشعال المصبعة وإشعال الوقود المطحون............ 79

الفصل الثالث :

- المواقد لإحتراق الوقود السائل والغازى................................. 93

الفصل الرابع :

- حسابات الإحتراق 131

الفصل الخامس :

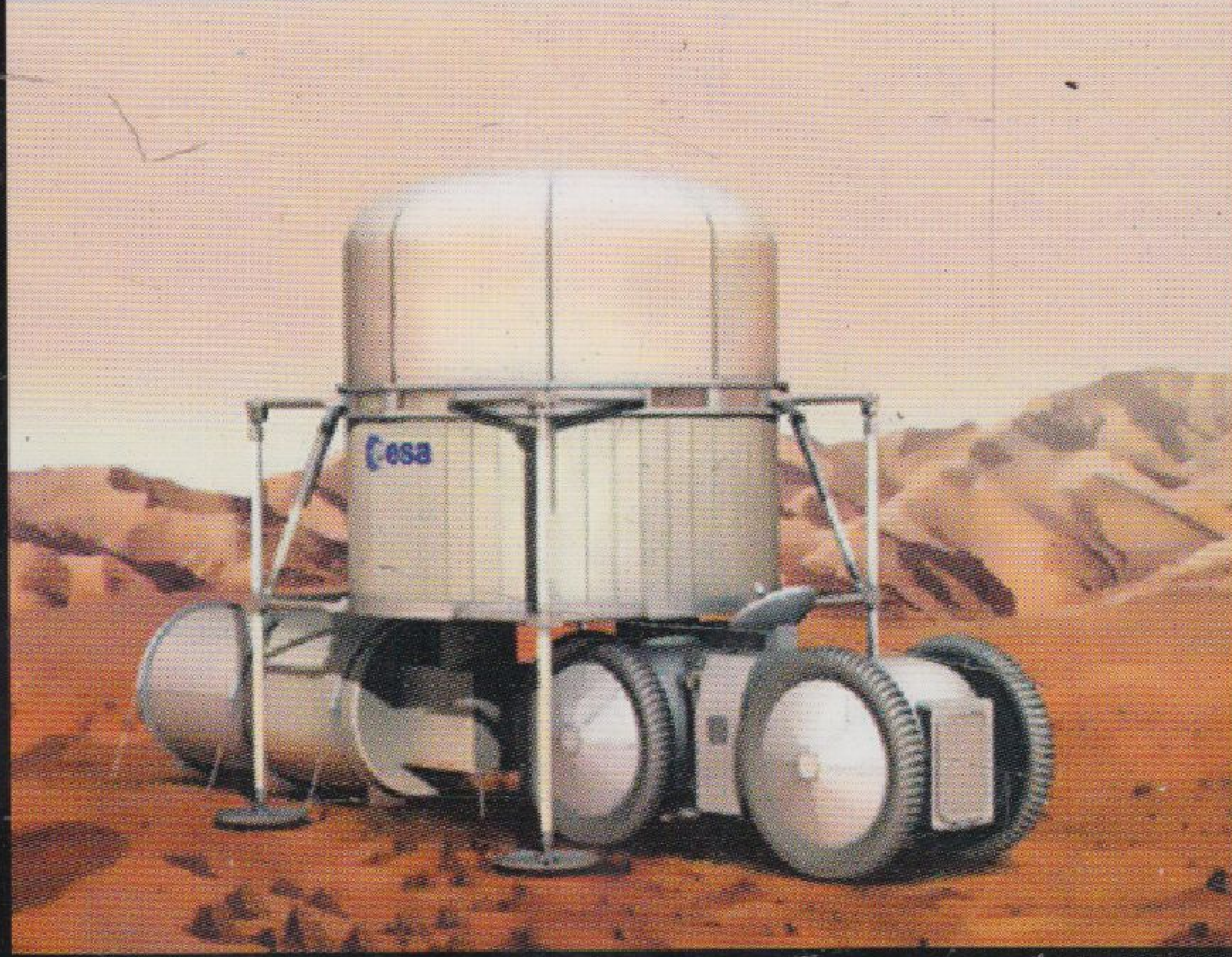
- تحليل الغاز وتعيين القيمة الحرارية 169

الفصل السادس :

- إحتراق طبقة التميؤ 177

الفصل السابع :

- نظام الإحتراق وإحكامه 185



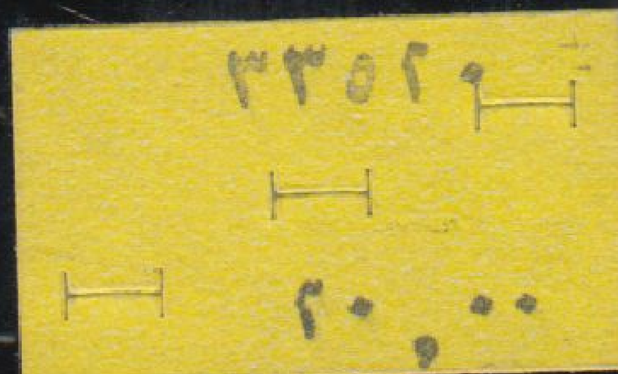
فى هذا الكتاب تم تناول موضوع تكنولوجيا الإحتراق وإنتاج الطاقة الحرارية، حيث تم تناول المبادئ العامة للإحتراق لمختلف أنواع الوقود الحفرى فى العمليات الصناعية وتشغيل الغلايات وذلك بهدف تحقيق أقصى إستفادة من الطاقة الحرارية وترشيد استخداماتها.





ISBN 978-977-287-864-2

دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع
٥٠ شارع الشيخ ريحان - عابدين- القاهرة
☎ ٢٧٩٥٤٢٢٩
www.sbhegypt.org
e-mail:sbh@link.net



جمال خليفة